

Untersuchungen zur Reduzierung der Zugkräfte beim Einziehen von  
Rohrleitungen mittels Schwingungstechnologie - ein innovativer Beitrag  
zur Reduzierung des Baurisikos bei HDD-Vorhaben

## **Dissertation**

zur Erlangung des Grades eines Doktors  
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von

**Dipl.-Ing. Stefan Roßbach**

aus Kirchen/Sieg

genehmigt von der

**Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften  
der Technischen Universität Clausthal**

**Tag der mündlichen Prüfung**

9. Dezember 2008

Vorsitzender der Promotionskommission

Univ.-Prof. Dr.-Ing. N. Meyer

Hauptberichterstatte

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil H. Tudescki

Berichterstatte

Univ.-Prof. Dr.-Ing. O. Langefeld

## Abstract

Die HDD-Technologie (HDD - Horizontal Directional Drilling) gilt heute als modernes und leistungsstarkes Verfahren zur grabenlosen Verlegung von Versorgungsleitungen und ist Stand der Technik. Das Einsatzspektrum des HDD-Verfahrens wurde durch Entwicklungsprozesse und Optimierungen stetig erweitert, insbesondere aufgrund der Vielzahl von Vorteilen gegenüber anderen, konventionellen Rohrverlegetechniken, aber auch aufgrund der steigenden Nachfrage nach großkalibrigen Bohrungen über 2 km Länge im internationalen Raum. Dieser Trend stellt besondere Ansprüche an die Leistungsfähigkeit des Verfahrens und die maschinelle Ausrüstung. Wie die Praxis zeigt, bleibt das Verfahren der HDD-Technik nicht von Rückschlägen verschont. So ereignen sich häufig Schadensfälle in Form des Steckenbleibens oder einer Havarie der zu installierenden Rohrtour, resultierend aus den mit zunehmender Einziehlänge wachsenden Reibungskräften, bedingt durch ungünstige Baugrundverhältnisse und damit einen instabilen Bohrkanal. Im ungünstigsten Fall muss die Bohrung aufgegeben werden, was mit hohen wirtschaftlichen Verlusten verbunden ist. Ein am Lehrstuhl für Tagebau und Internationaler Bergbau der TU Clausthal durchgeführtes Forschungsprojekt hat sich dieser verfahrenstechnischen Problematik angenommen, mit dem Ziel, durch empirische Untersuchungen im Technikumsmaßstab die erforderlichen Zugkräfte beim Einziehvorgang einer Rohrleitung mittels des Einsatzes von Vibrationstechnik herabzusetzen. Resultierend aus den vorgenommenen systematischen Untersuchungen konnte die prinzipielle Eignung des ‚Vibrationsverfahrens‘ für eine großtechnische Feldanwendung nachgewiesen werden. Hierdurch wird ein Beitrag zur Verringerung des Baurisikos bei HDD-Vorhaben geleistet.

Trenchless pipe laying by using HDD technique, today, is a modern and powerful method, that implements lots of benefits compared to other, conventional pipe installing operations. The application spectrum of this state-of-the-art technology continuously has been increased by development processes and optimizations, particularly due to the rising demand for large-caliber drillings and ultra-long pipe distances. However, the HDD method covers a high construction risk due to unpredictable and difficult to manage subsoil conditions, which sometimes result in stuck pipes or damages of the product pipe. In worst case the project must be abandoned which is combined with high economic losses. These described problems always can be traced back to underestimated friction forces. An R&D project, accomplished at the Department for Surface Mining and International Mining of the TU Clausthal, has taken up this procedural set of problems. The objective target of the investigation within the frame of the PhD thesis on hand was to reduce the tractive forces which are required for the installation process by applying vibrations into the pipe. Due to the achieved research results it generally can be considered that the vibration method for HDD applications can be transferred to practical in-field conditions. This contributes to the reduction of the construction risk within HDD-projects.

## **Vorwort**

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Tagebau und Internationaler Bergbau des Instituts für Bergbau an der Technischen Universität Clausthal.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Hossein Tudescki für das mir über die gesamte Zeit hinweg entgegengebrachte Vertrauen, das es mir ermöglichte, die Aufgabenstellung selbständig koordinieren und bearbeiten zu können.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Oliver Langefeld danke ich für die bereitwillige Übernahme des Korreferates, ebenso danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Norbert Meyer für die freundliche Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Meinen Kollegen bin ich für die stete Gesprächsbereitschaft und die stets gute Zusammenarbeit dankbar, ferner den wissenschaftlichen Hilfskräften Herrn Christian Diegel und Herrn Raheb Bagherpour für die Unterstützung bei der Versuchsdurchführung.

Die Verwirklichung der im Rahmen eines Forschungsprojektes gestellten Aufgabe, wurde wesentlich von den beteiligten Projektpartnern DCA Europe, RWE Netzservice GmbH und E.ON Ruhrgas ermöglicht. Für die finanzielle Unterstützung, organisatorische Koordination, fachliche Begleitung, Motivation und nicht zuletzt Geduld gilt den Mitgliedern der im Rahmen des Projektes gegründeten Arge HDD-Förderkreis, namentlich Herrn Lübbers, Herrn Graßmann, Herrn Kißing, Herrn Birtner, Herrn Meyer, Herrn Zirnis und Herrn Schwengler, mein besonderer Dank.

Ferner bedanke ich mich bei Herrn Lohse von der Fa. NetterVibration für das stete Interesse, die Projektbegleitung und technische Beratung sowie bei Herrn Heep von der Abteilung Werkstofftechnik von E.ON Ruhrgas für die Unterstützung bei der rechnerischen Materialanalyse.

Mein ganz besonderer Dank richtet sich an die Werkstätten des Instituts für Bergbau. Den zahlreichen fachlichen Diskussionen und motivierenden Gesprächen, der steten Hilfsbereitschaft und kontinuierlichen technischen Betreuung meiner Arbeit, insbesondere bei der Planung und Konstruktion der Versuchsanlage durch die Herren Wolfgang Fischer, Wolfgang Exner und Heinz-Walter Ilseman sowie allen übrigen Mitarbeitern der Werkstätten verdanke ich das Gelingen dieser Arbeit.

Schließlich möchte ich besonders meiner Familie danken, meinen Eltern für Ihre stete Unterstützung im Studium und danach, meinem Schwiegervater für die germanistische und grammatikalische Überarbeitung des Textes, vor allem aber meiner lieben Frau Esther, die mir durch ihre Unterstützung und Rücksichtnahme während der gesamten Zeit sehr geholfen hat. Auch meinem Sohn Jakob danke ich für diejenigen Momente, in denen er mich trotz aller Arbeit zeitweise wieder auf andere Gedanken gebracht hat. Ihnen widme ich diese Arbeit.

Clausthal, im Dezember 2008

Stefan Roßbach



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Die gesteuerte Horizontalbohrtechnik (HDD) .....</b>	<b>4</b>
2.1	Verfahrensbeschreibung .....	4
2.2	Systemkomponenten .....	7
2.3	Rohrbau .....	18
2.4	Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit des HDD .....	19
2.5	Dimensionierung und Auswahl geeigneter Bohrgeräte .....	21
2.6	Risikoschwerpunkte beim HDD .....	23
<b>3</b>	<b>Physikalische und geophysikalische Grundlagen .....</b>	<b>27</b>
3.1	Kenngößen der Rotationsschwingungen .....	27
3.2	Schwingungsverhalten von Rohrleitungen .....	28
3.3	Geomechanische und bodenphysikalische Grundlagen .....	34
3.3.1	Grundlegende Eigenschaften und Basisgrößen von Böden .....	34
3.3.2	Verhalten von Böden unter statischer Belastung .....	39
3.3.3	Verhalten von Böden unter dynamischer Belastung .....	45
3.4	Mantelreibung beim Rohreinzug .....	53
3.5	Bohrspülung .....	58
3.5.1	Aufgaben .....	58
3.5.2	Rheologische Eigenschaften .....	61
<b>4</b>	<b>Stand der Technik der Schwingungsapplikation im Bau- und Bohrwesen .....</b>	<b>66</b>
4.1	Vibrationsrammung .....	66
4.2	Sonic Drilling .....	69
4.3	Pipe Vibration Technologie .....	70
4.4	Tiefenverdichtung .....	73
<b>5</b>	<b>Entwicklungsziele für das Vibrationsverfahren beim HDD .....</b>	<b>75</b>
<b>6</b>	<b>Pilotversuche (Kurzrepetition) .....</b>	<b>78</b>
<b>7</b>	<b>Versuchsprogramm .....</b>	<b>83</b>
7.1	Offene Fragen .....	83
7.2	Formulierung von Ziel- und Einflussgrößen .....	84
7.3	Verwendete Modellböden .....	85
7.4	Verwendete Versuchsrohre .....	87
7.5	Parametervariation bei der Versuchsdurchführung .....	87
<b>8</b>	<b>Aufbau und Beschreibung der Versuchsanlage .....</b>	<b>91</b>
8.1	Grundträger- und Materialkastenkonstruktion .....	91
8.2	Einziehvorrichtung .....	94

8.3	Schwingungsaggregate .....	96
8.4	Messtechnik .....	98
8.5	Zusatz- und Sicherheitseinrichtungen .....	99
<b>9</b>	<b>Versuchsergebnisse und Interpretation .....</b>	<b>101</b>
9.1	Allgemeine Effekte des Schwingungseintrags .....	101
9.2	Einfluss der Vibratorleistung .....	105
9.3	Einfluss der statischen Auflast in Abhängigkeit des Schwingungseintrags .....	107
9.4	Einfluss der Rohrgeometrie in Abhängigkeit des Schwingungseintrags .....	109
9.5	Einfluss der Einziehgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Schwingungseintrags .....	114
9.6	Einfluss der Rohrmanteloberflächenbeschaffenheit in Abhängigkeit des Schwingungseintrags .....	116
9.7	Einfluss der Baugrundbeschaffenheit in Abhängigkeit des Schwingungseintrags .....	120
9.8	Einfluss der Vibratorposition .....	127
<b>10</b>	<b>Zusammenfassende Bewertung der Technikumsversuche.....</b>	<b>130</b>
<b>11</b>	<b>Materialverhalten unter Schwingungseinfluss .....</b>	<b>136</b>
11.1	Berechnungsgrundlagen und Vorgaben .....	136
11.2	Modellrechnung .....	138
11.2.1	Abschätzung der Querauslenkung des Rohres .....	138
11.2.2	Berechnung der Biegespannung infolge der Querauslenkung .....	140
11.3	Ergebnis der Festigkeitsanalyse .....	141
11.4	Ableitung eines analytischen Berechnungsansatzes.....	142
<b>12</b>	<b>Übertragbarkeit in die Praxis .....</b>	<b>144</b>
12.1	Berechnungsansätze .....	144
12.1.1	Konventionelle Abschätzung des Reibungswiderstandes und der erforderlichen Zugkraft .....	144
12.1.2	Berücksichtigung des Vibrationseintrags .....	147
12.1.3	Mechanisches Ersatzmodell .....	148
12.1.4	Leistungsabschätzung des Schwingungsaggregats .....	151
12.2	Vibrationstechnik .....	152
12.3	Rohrinterne Verspannung.....	156
<b>13</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>158</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>167</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>171</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>172</b>
	<b>Anlagen</b>	

# 1 Einleitung

Ein beträchtlicher Teil der globalen Infrastruktur zur Energie- und Rohstoffversorgung sowie zur Entsorgung von Abwässern besteht heute aus Rohrleitungen bzw. Rohrleitungsnetzen. Diese Leitungssysteme bilden eine wichtige Voraussetzung für die Entwicklung moderner, leistungsfähiger Industriegesellschaften und tragen damit wesentlich zur Funktionsfähigkeit des menschlichen Gemeinwesens sowie zur Sicherung des Lebensstandards und der Hygiene in menschlichen Siedlungen bei. Ohne funktionierende Pipeline-Netzwerke wäre der Transport fluiden und gasförmiger Energieträger wie Öl und Gas über weite Distanzen, von der ergiebigen Lagerstätte bis zu den Endabnehmern, nicht möglich.

Die Planung, der Bau und der Betrieb von Leitungsnetzen stellen hohe Ansprüche sowohl an die ingenieurtechnische Planung als auch an das organisatorische Management sowie das technische Equipment. In besonders exponierten Gebieten, wie beispielsweise schwer zugänglichem Gelände, Naturschutzgebieten oder im Bereich von Gewässern, kann sich eine konventionelle Leitungsverlegung im offenen Rohrgraben mitunter als schwierig erweisen, speziell dann, wenn Umweltaspekte berücksichtigt werden müssen. Unter Umständen kann ein Rohrleitungsprojekt - wenn überhaupt - dann nur unter hohem finanziellem und technischem Aufwand realisiert werden. Insbesondere aufgrund dieser Aspekte haben sich grabenlose Verfahren der Rohrverlegung zunehmend als Standardtechnik etabliert und kontinuierlich weiterentwickelt.

Die gesteuerte Horizontalbohrtechnik (engl. HDD - Horizontal Directional Drilling) im oberflächennahen Bereich wurde Mitte der 1970er Jahre in den USA aus dem in der Erdöl- und Erdgasindustrie zur Exploration von Lagerstätten angewandten Verfahren der gesteuerten Richtbohrtechnik (Directional Drilling) entwickelt. Ziel dieser Entwicklung war hierbei jedoch nicht die Erkundung oder Erschließung von Rohstoffvorkommen in der Erdkruste, sondern die grabenlose Herstellung und Nutzung eines Bohrlochs zur Aufnahme einer Rohrleitung. Durch diese Technologie wurde es möglich, natürliche und/oder künstliche Hindernisse, wie beispielsweise Flüsse, infrastrukturelle Einrichtungen oder Biotope im Zuge von Pipeline-Verlegungen ohne Beeinträchtigung der Geländeoberfläche zu unterqueren. Durch die installierten Rohrleitungen können entweder direkt gasförmige oder flüssige Medien transportiert werden, oder sie dienen als Schutzrohre für darin verlegte Energie- und Telekommunikationskabel.

In der Vergangenheit wurde das Einsatzspektrum des HDD-Verfahrens durch Entwicklungsprozesse und Optimierungen stetig erweitert, insbesondere aufgrund der Vielzahl von Vorteilen gegenüber anderen, konventionellen Rohrverlegetechniken, aber auch aufgrund der steigenden Nachfrage nach großkalibrigen Bohrungen über 2 km Länge im internationalen Raum. Vor diesem Hintergrund werden die grabenlosen Verfahren auch in Zukunft zunehmend an Bedeutung gewinnen. Insbesondere das Entwicklungspotential der HDD-Technik ist noch längst nicht ausgeschöpft.

Trotz der Vielzahl von Vorteilen ist der grabenlose Rohrvortrieb mittels HDD mit verfahrensspezifischen Risiken verbunden, die nicht selten zum Scheitern eines Projektes führen. Vor allem der letzte Verfahrensschritt beim HDD, das Einziehen der fertig vormontierten Rohrleitung in die zuvor pilotierte und aufgeweitete Bohrung kann, vor allem bei schwierigen Baugrundverhältnissen, zu Komplikationen führen. Infolge dessen kann es dazu kommen, dass die teilweise in den Bohrkanal eingezogene Rohrleitung stecken bleibt. Die zum Lösen bzw. Freiziehen des Rohrstranges erforderlichen Zugkräfte können dann u.U. nicht mehr vom Bohrgerät aufgebracht werden, so dass ggf. andere technische Behelfslösungen herangezogen werden müssen, um die Leitung und damit das Projekt - falls überhaupt möglich - zu retten.

Das vorliegende Forschungsprojekt orientiert sich an dieser Problemstellung und soll einen Beitrag zur Optimierung des HDD-Verfahrens, insbesondere im Hinblick auf den Verfahrensschritt ‚Einziehen der Produktrohrleitung‘, leisten. Durch ein innovatives Verfahren, das auf der Applikation von hochfrequenten Schwingungen basiert, soll das Baurisiko bei der Realisierung von HDD-Projekten verringert werden. Daraus resultiert nicht zuletzt ein hoher wirtschaftlicher Nutzen für den Anwender bzw. den Vorhabenträger. Die im Rahmen des Projektes vorgenommenen Untersuchungen haben Entwicklungscharakter und können sich auf keine praktischen Erfahrungen stützen.

Ziel und Aufgabe der Forschungsarbeiten war es, ausgehend vom Stand der Technik und praktischen Erfahrungen beim Einsatz der HDD-Technologie, durch empirische Untersuchungen im Technikumsmaßstab, Lösungsansätze zur Optimierung des Einziehvorganges von Rohrleitungen zu erarbeiten. Dabei sollte vorrangig der Einfluss der Einleitung gezielter Schwingungen in die zu verlegende Rohrleitung auf die auftretenden Einziehkräfte unter definierten Randbedingungen untersucht werden. D.h. einerseits sollten die erforderlichen Einziehkräfte während des konstanten Einziehvorgangs reduziert, und andererseits die Möglichkeit geschaffen werden, ein bereits festgefahrenes Produktrohr zu lösen, also die erforderlichen initialen Losbrechkräfte herabzusetzen.

In einer ersten Projektphase wurde mittels einer kleinmaßstäblichen Pilotversuchsanlage die prinzipielle Eignung und Machbarkeit des ‚Vibrationsverfahrens‘ untersucht. Die positiven Ergebnisse haben Anlass gegeben, das Projekt in einer anschließenden und auf den

Pilotversuchen aufbauenden Versuchsphase weiterzuführen, insbesondere mit der Zielsetzung der Quantifizierung der auf die Zugkraft Einfluss nehmenden Parameter. Daraus sollen letztlich Aussagen zur Möglichkeit der Verfahrensoptimierung sowie Empfehlungen für die Ausführungspraxis abgeleitet werden.

Für die Erfassung und Beschreibung der komplexen dynamischen Vorgänge bei der im Rahmen der Forschungsarbeit untersuchten Schwingungsapplikation beim Rohreinzug sowie der daraus resultierenden Interaktion mit dem Baugrund ist es unabdingbar, die den Betrachtungen zugrunde liegenden und für die spätere Interpretation erforderlichen relevanten schwingungs- und bodenphysikalischen Grundlagen darzustellen. Um der Aufgabenstellung mit dem Ziel der Zugkraftreduzierung gezielt und systematisch nachzugehen, wurden auf Basis der theoretischen Überlegungen offene Fragen formuliert, an denen sich die praktische Versuchsdurchführung orientierte.

## **2 Die gesteuerte Horizontalbohrtechnik (HDD)**

### **2.1 Verfahrensbeschreibung**

Die als Horizontal Directional Drilling (HDD) bezeichnete gesteuerte Horizontalbohrtechnik erlaubt es, eine in ihrem Verlauf gelenkte Bohrung entlang einer vorgegebenen Bohrachse herzustellen. Technisch ist das HDD den Spülbohrverfahren zuzuordnen, wobei das vom Bohrwerkzeug gelöste Bodenmaterial durch ein zirkulierendes Spülmedium ausgetragen wird. Je nach Anforderungen des zu durchörternden Untergrunds kann als Spülmedium Wasser oder eine Suspensionslösung (z.B. Bentonit-Wasser-Suspension) zum Einsatz kommen.

Die für den Bohrfortschritt erforderliche Andruckkraft sowie das notwendige Drehmoment werden vom übertägig positionierten Bohrgerät erzeugt und über den Bohrgestängestrang auf das Bohrwerkzeug übertragen.

Durch den Einsatz einer Ortungssonde, die direkt hinter dem Bohrkopf positioniert ist und in der Regel auf der Ausnutzung des Erdmagnetfelds beruht, kann die Position des Bohrkopfes ermittelt werden. Die jeweiligen Positionsdaten werden über ein Messkabel in den Steuerstand der Bohranlage geleitet.

Das Lösen des anstehenden Bodens beim Bohrvortrieb erfolgt auf hydromechanische Weise. Zum größten Teil wird das Material durch im Bohrmeißel integrierte Düsen, durch die die Spülflüssigkeit zu Strahlen gebündelt austritt, gelöst und anschließend durch die Spülflüssigkeit im Ringraum zwischen Bohrgestänge und Bohrlochwand abtransportiert.

Obwohl das HDD-Verfahren für die Durchörterung von Lockergesteinen prädestiniert ist, können prinzipiell auch Bohrungen im Festgestein hergestellt werden. Hierbei erfolgt die Lösearbeit vorwiegend mechanisch durch die Verwendung von Rollenbohrmeißeln, die in der Regel von Bohrlochmotoren (Untertagemotoren, Down-Hole-Motoren) nach dem Moineau-Prinzip angetrieben werden. HDD-Bohrungen im Felsgestein unterliegen im Vergleich zu Lockergesteinsbohrungen einem erheblich höheren technischen Aufwand aufgrund der geringen Bohrgeschwindigkeit und der Erforderlichkeit spezieller Bohrwerkzeuge.

Der Verfahrensgang eines HDD-Projektes im oberflächennahen Bereich kann typischer Weise in drei Verfahrensschritte eingeteilt werden:

1. Herstellen der Pilotbohrung
2. Ein- oder mehrfaches Aufweiten des Bohrlochs (Aufweitbohrung(en))
3. Einziehen der Produktrohrleitung (Einziehvorgang)

### **PILOTBOHRUNG**

Nach dem Festlegen der Bohrtrasse wird zunächst eine kleinkalibrige Pilotbohrung mittels einer HDD-Bohranlage hergestellt. Dabei wird von der sog. Rig-Site aus ein am vorderen Ende des Gestänges installierter Bohrmeißel unter einem, entsprechend der Projektvorgaben festgelegten Winkel (i.d.R. ca. 5 - 20°), drehend in das Erdreich eingefahren.

Nachdem die ersten Bohrstangen gerade abgebohrt wurden, wird die Arbeitsrichtung des Bohrmeißels geändert, so dass er einer festgelegten Bohrachse folgt und im elastischen Radius die horizontale Lage erreicht. Die Veränderung der Arbeitsrichtung erfolgt über Knickstücke (bent subs), die unmittelbar hinter dem Bohrmeißel angeordnet werden und durch die der Meißel in einem definierten Winkel zur Längsachse des Bohrgestängestranges ausgelenkt wird. Neben dem Einsatz von Knickstücken können auch asymmetrisch gestaltete Bohrmeißel mit geneigter Gleitfläche eingesetzt werden. Der Betrag des Ablenkungswinkels wird bei rotierendem Bohrgestänge durch das Mitdrehen des Bohrwerkzeugs neutralisiert und der Bohrstrang linear vorgetrieben. Durch das Einstellen der Rotationsbewegung bei gleichzeitigem Vorschub erfolgt ein Gleiten über das Knickstück bzw. die Gleitfläche des Bohrmeißels, wobei das Bohrwerkzeug in die gewünschte Richtung abgelenkt wird.

Die zum Einhalten der geplanten Bohrachse erforderlichen Informationen über die jeweilige Position des Bohrmeißels werden in der Regel über so genannte „Steering Tools“ erfasst und nach übertage zur Bohranlage via Kabel übertragen. Über Magnetometer und Inklinometer können damit – analog zur Tiefbohrtechnik – aktuelle Werte für Richtung (Azimut), Neigung (Inclination) und Meißelstellung (Toolface) permanent während des Bohrvorganges überwacht und die Vortriebsrichtung durch Steuerimpulse ggf. korrigiert werden.

Das Bohrloch wird während des Bohrvorganges durch eine zirkulierende Spülung aus Ton-Wasser-Suspension (Bentonit) gestützt. Diese dient auch dem Austrag des gelösten Bohrkleins aus dem Bohrloch.

Abb. 2-1 zeigt den prinzipiellen Verfahrensgang der Pilotbohrlochherstellung beim HDD.

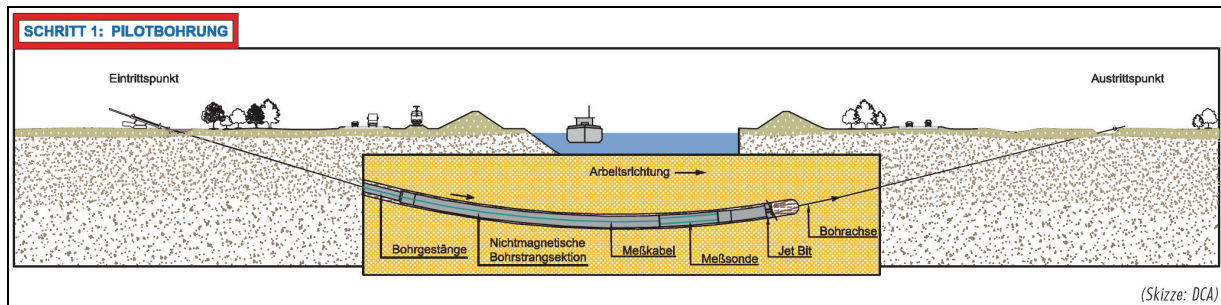


Abb. 2-1: Prinzipdarstellung der Herstellung einer Pilotbohrung beim HDD [77]

### AUFWEITBOHRUNG(EN)

Nachdem die Pilotbohrung fertig gestellt und der Bohrkopf am Zielpunkt an der Tagesoberfläche ausgetreten ist, wird der Bohrkanal auf einen größeren Durchmesser aufgeweitet. Hierzu werden der Bohrmeißel und die Messsondengarnitur entfernt und ein in Gegenrichtung orientiertes Aufweitwerkzeug (Räumer, engl.: Reamer) installiert. Der Aufweitkopf wird im Rückwärtsgang rotierend und spülend vom Ziel- zum Ausgangspunkt durch den erstellten Pilotbohrkanal zurückgezogen. Zur Herstellung großkalibriger Bohrungen kann dieser Vorgang mehrfach, d.h. mit stufenweiser Erhöhung des Räumerdurchmessers, wiederholt werden, bis der erforderliche Enddurchmesser erreicht ist. Im Allgemeinen wird der Enddurchmesser des Bohrlochs um den Faktor 1,2 bis 1,5 größer dimensioniert als der Außendurchmesser der zu installierenden Produktrohrtour.

Um sicherzustellen, dass sich ständig ein kompletter, durchgängiger Gestängestrang im Bohrloch befindet, wird für jede an der Bohranlage auf der Rig-Site entfernte Bohrstange auf der gegenüber liegenden Pipe-Site eine Bohrstange nachgesetzt.

Die Stützung der Bohrlochwand erfolgt auch bei diesem Verfahrensschritt im Wesentlichen durch den hydrostatischen Druck der im Bohrloch befindlichen Bohrspülung.

Der Teilvorgang des Aufweitens einer HDD-Bohrung ist schematisch in Abb. 2-2 dargestellt.

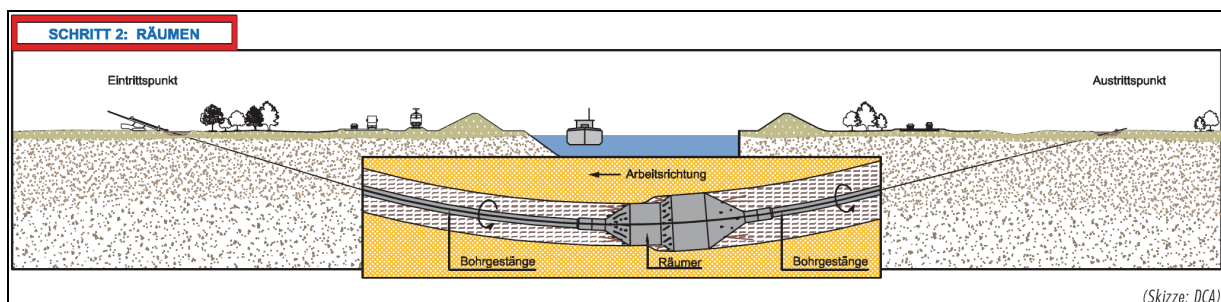


Abb. 2-2: Prinzipdarstellung der Herstellung einer Aufweitbohrung beim HDD [77]



### EINZIEHVORGANG

Den letzten Teilvorgang beim HDD stellt das Einziehen der Produktrohrleitung in das fertig aufgeweitete Bohrloch dar. Die Rohrleitung wird auf der Pipe-Site für den Einziehvorgang hergerichtet.

Unterschiedliche Varianten des Einziehvorgangs ergeben sich in Abhängigkeit der Leitungsart, des Durchmessers, des Rohrmaterials sowie entsprechend örtlicher Gegebenheiten. Flexible Rohrleitungen, zumeist mit niederen Querschnitten, können, insbesondere bei beengten Platzverhältnissen von einer bereitgestellten Trommel abgezogen werden. Bei biegesteiferen Rohrmaterialien können einzelne Rohrsegmente kurz vor dem Einziehen mit dem bereits eingezogenen Strang verbunden werden. Insbesondere bei Großprojekten wird der Rohrstrang im Allgemeinen komplett vormontiert und im offenen Gelände auf voller Länge ausgelegt. Zur Reduzierung der Reibung zwischen Rohrtour und Bodenoberfläche wird der Rohrstrang auf Rollen- oder Gleitbahnen gelagert.

Der Einziehvorgang erfolgt, nach Prüfung der Schweißverbindungsstellen zwischen den einzelnen Segmenten, in einem Arbeitsgang von der Pipe-Site aus in Richtung des Bohrgerätes. Hierzu wird das freie Ende der Rohrleitung über einen Einziehkopf und Drehwirbel an das Räumwerkzeug angeschlagen. Der Drehverbinder hat die Aufgabe, die Rotationsbewegung des Räumers während des Einziehens vom Produktrohrstrang zu entkoppeln, um damit ein Mitdrehen des Produktrohres zu verhindern.

Der Verfahrensschritt des Einziehens einer Pipeline ist der Abb. 2-3 zu entnehmen.

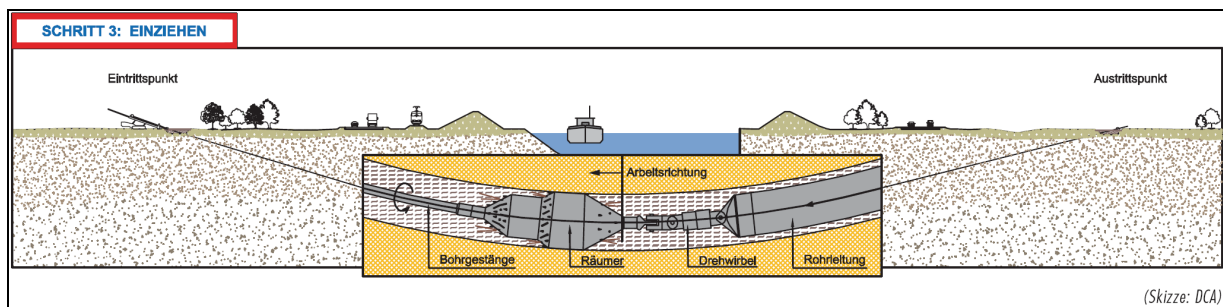


Abb. 2-3: Prinzipdarstellung des Einziehvorgangs eines Produktrohres beim HDD [77]

## 2.2 Systemkomponenten

Eine HDD-Anlage setzt sich aus mehreren maschinentechnischen Einzelkomponenten zusammen, die zusammen eine Systemeinheit bilden. Grundsätzlich kann unterschieden werden zwischen der sog. ‚Rig-Site‘, also der Lokation, auf der sich am Eintrittspunkt der

Bohrung das Bohrgerät befindet, und der sog. ‚Pipe-Site‘, auf der der für den Einzug ins Bohrloch vorbereitete Rohrstrang auf der Austrittsseite der Pilotbohrung hergerichtet wird. Auf beiden Seiten befinden sich hierfür charakteristische Maschinen und Anlagenkombinationen (Abb. 2-4).

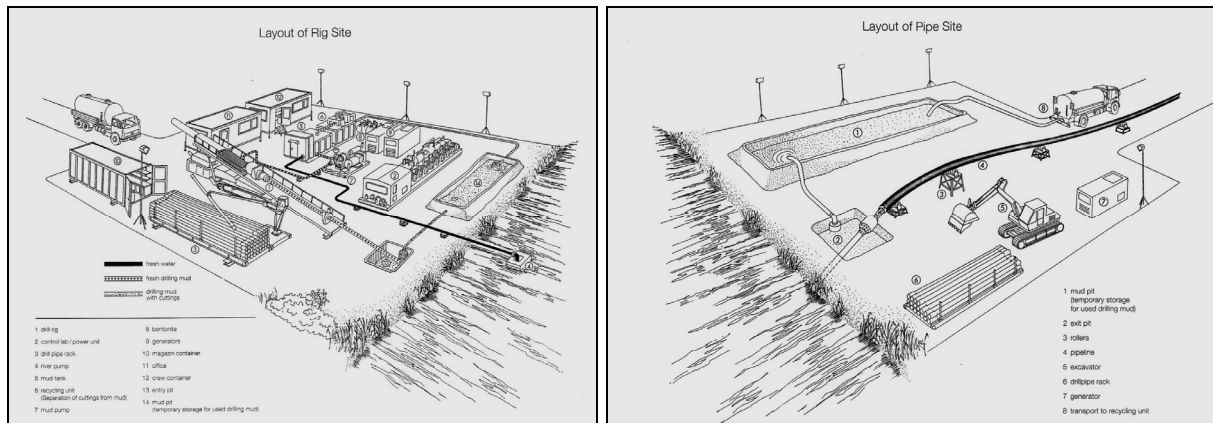


Abb. 2-4: Verfahrenstypische Baustelleneinrichtung bei HDD-Projekten, links: Rigsite, rechts: Pipesite [39]

Das Gesamtsystem wird vervollständigt durch die Systemkomponenten der erforderlichen Infrastruktur. Als maschinelle Hauptkomponenten können genannt werden:

- das Bohrgerät,
- die Energieversorgungseinheit,
- der Steuerstand,
- Pumpenaggregate,
- die Bohrspülmischanlage,
- die Spülungsrecyclinganlage sowie
- der Rohrstrang und die Bohrwerkzeuge.

Nachfolgend werden die wesentlichen Aufgaben und Merkmale der o.g. Anlagenkomponenten kurz beschrieben.

### BOHRGERÄT

Die Grundelemente von Horizontalbohrgeräten stellen, dem Prinzip einer Lafettenbohrmaschine entsprechend, ein Stahlrahmen und ein darauf montierter, verfahrbarer Schlitten mit dem Kraftdrehkopf dar. Der Rahmen kann mittels Stützen einseitig in seiner Neigung verstellt werden, um den bei der Projektierung festgelegten Eintrittswinkel zu realisieren. Aufgabe des Bohrschlittens ist die Führung des Bohrmotors, der, im Allgemeinen

diesel- oder elektrohydraulisch, seltener pneumatisch angetrieben, das Drehmoment zur Rotation des Bohrstranges erzeugt. Durch eine Vorschubeinrichtung, zumeist in Form von Ketten-, Hydraulik- oder Zahnrad-Zahnstangen-Systemen, werden die für den Bohrfortschritt notwendigen Andruckkräfte und die für den Aufweit- und Einziehvorgang erforderlichen Zugkräfte bereitgestellt.

Um einen raschen Ortswechsel der HDD-Anlage zu gewährleisten, sind die Lafettenbohrmaschinen auf einem Unterbau montiert. Im einfachsten Fall kann dies eine robuste Stahlrahmenkonstruktion mit Gleitkufen sein (Frame-Rigs). Andere, weit verbreitete Bauformen von Unterwagen sind integrierte Rad- oder Kettenlaufwerke (Crawler-Rigs) sowie die Montage des Oberbaus auf einem Sattelaufleger (Trailer-Rigs). Bei den radgestützten Konstruktionsweisen wird eine hohe Mobilität auf Straßen und befestigten Wegen erreicht, Kettenlaufwerke gewährleisten darüber hinaus eine hohe Geländegängigkeit.



Abb. 2-5: HDD-Bohrgerät in Trailer-Rig-Ausführung der Fa. Herrenknecht AG [29]

Neueste Entwicklungstrends bei der Konstruktion von HDD-Bohrgeräten sehen eine modulare Bauweise vor; diese entsprechen handelsüblichen ISO-genormten Containersystemen. Insbesondere bei schweren HDD-Anlagen ist der Auf- und Abbau aus mehreren kleinen und relativ leichten Transporteinheiten im Sinne der Mobilität und Rüstzeit von Vorteil.

Eine weitere bedeutende Aufgabe des Unterbaus ist die Gewährleistung der Standsicherheit, wobei die bei den HDD-Teilvorgängen auftretenden und sich auf die Konstruktion übertragenden Kräfte aufgenommen und in das Erdreich übertragen werden müssen. Determiniert wird die Standsicherheit u.a. durch das Verhältnis von Eigengewicht zu Andruck- und Zugkraft sowie der Beschaffenheit der Standfläche. Darüber hinaus können HDD-Anlagen mit Vorrichtungen zum Einbringen von Erdankern ausgestattet sein. Gegebenenfalls ist es erforderlich, besondere Widerlager für die HDD-Maschine in den Boden

einzubringen. Diese können beispielsweise in Form von Betonfundamenten oder -klötzen, Stahlträgern oder Spundwandkonstruktionen realisiert werden.

Ein gängiges Einteilungskriterium von HDD-Bohrgeräten in Leistungsklassen ist die maximal erreichbare Zugkraft. Eine derzeit gültige Klassifizierung liefern die Technischen Richtlinien des DCA (Tab. 2-1).

Tab. 2-1: Übliche Klassifizierung von HDD-Bohrgeräten [77]

Bohrgerätetyp	Max. Zugkraft [kN]	Max. Drehmoment [kNm]	Einsatzgewicht [t]
Mini	$\leq 150$	10 - 15	$\leq 10$
Midi	$> 150$ bis $\leq 400$	15 - 30	10 - 25
Maxi	$> 400$ bis $\leq 2.500$	30 - 100	25 - 60
Mega	$> 2.500$	$> 100$	$> 60$

### ENERGIEVERSORGUNGSEINHEIT

Den größten Energiebedarf auf einer HDD-Baustelle haben das Bohrgerät und die Hochdruckpumpen. Die bei Horizontalbohrprojekten erforderliche Energie für den Betrieb der Anlage wird i.d.R., je nach Einsatzbedingungen und Anlagengröße, durch ein oder mehrere Energieversorgungseinheiten, sog. Power Packs, bereitgestellt. Darin wird die mittels Dieselaggregaten erzeugte Primärenergie in elektrische und/oder hydraulische Energie umgewandelt und den jeweiligen Verbrauchern zugeführt.

Vorteil dieses Verfahrens ist, dass die Bohranlage energietechnisch autark betrieben werden kann, d.h. eine externe Energieversorgung, beispielsweise über das öffentliche Stromnetz, ist nicht erforderlich. Die Anlage kann somit auch in abgelegenen, infrastrukturell schlecht erschlossenen Bohrlokalationen unabhängig betrieben werden.

Die installierte Gesamtleistung großer HDD-Bohranlagen kann im Bereich von ca. 2.000 kW und mehr liegen. Die Power Packs werden zumeist in schallisolierten 20 - oder 40“-Containern untergebracht.

### STEUERSTAND

Vom Steuerstand aus erfolgt die Bedienung der HDD-Anlage. Alle, den Bohrprozess beeinflussenden Parameter, wie beispielsweise Drehmomente, Kräfte und Pumpraten können

vom Bohrmeister gesteuert und überwacht werden. Ferner gehen hier Informationen über den Verlauf des Bohrlochs in Form von Messsignalen ein.

Insbesondere bei großen Horizontalbohranlagen sind die Steuerstände zumeist in separaten Containern untergebracht und bieten zusätzlich einen Arbeitsplatz für sonstiges Personal wie beispielsweise den Vermesser oder Bauleiter.



Abb. 2-6: Steuerstand einer HDD-Bohranlage [39]

### **PUMPENAGGREGATE**

Im Allgemeinen sind bei HDD-Projekten zwei separate Pumpensysteme erforderlich:

- die Hochdruckpumpe zur Aufrechterhaltung des Bohrspülungskreislaufs sowie zur Spülungsbeaufschlagung der Meißeldüsen und
- die Wasserpumpe, die der Versorgung der Bohrspülungsmischanlage mit Frischwasser dient.

Die Anforderungen an die Hochdruckpumpe sind besonders hoch, da einerseits, je nach Einsatzbedingung, sehr hohe Volumenströme (von bis zu 4 m<sup>3</sup>/min) des ggf. viskosen Spülungsmediums bereitgestellt, und andererseits entstehende Druckverluste (von teilweise über 100 bar) in den Zuleitungen, im Bohrgestänge und an den Meißeldüsen kompensiert



werden müssen. Gemäß diesen Vorgaben betragen die installierten Leistungen der Hochdruckpumpen bis zu 500 kW.

Die Energieerzeugung erfolgt i.d.R. mittels Dieselmotoren. Die Energie wird entweder direkt auf mechanischem Weg (Getriebe) oder über eine hydraulische Pumpe-Motor-Kombination an die Hochdruckpumpeneinheit übertragen.

Insbesondere bei großen HDD-Projekten mit hohen erforderlichen Spülraten sowie bei Horizontalbohrungen im Festgestein können erforderlichenfalls mehrere Hochdruckpumpen parallel geschaltet werden.

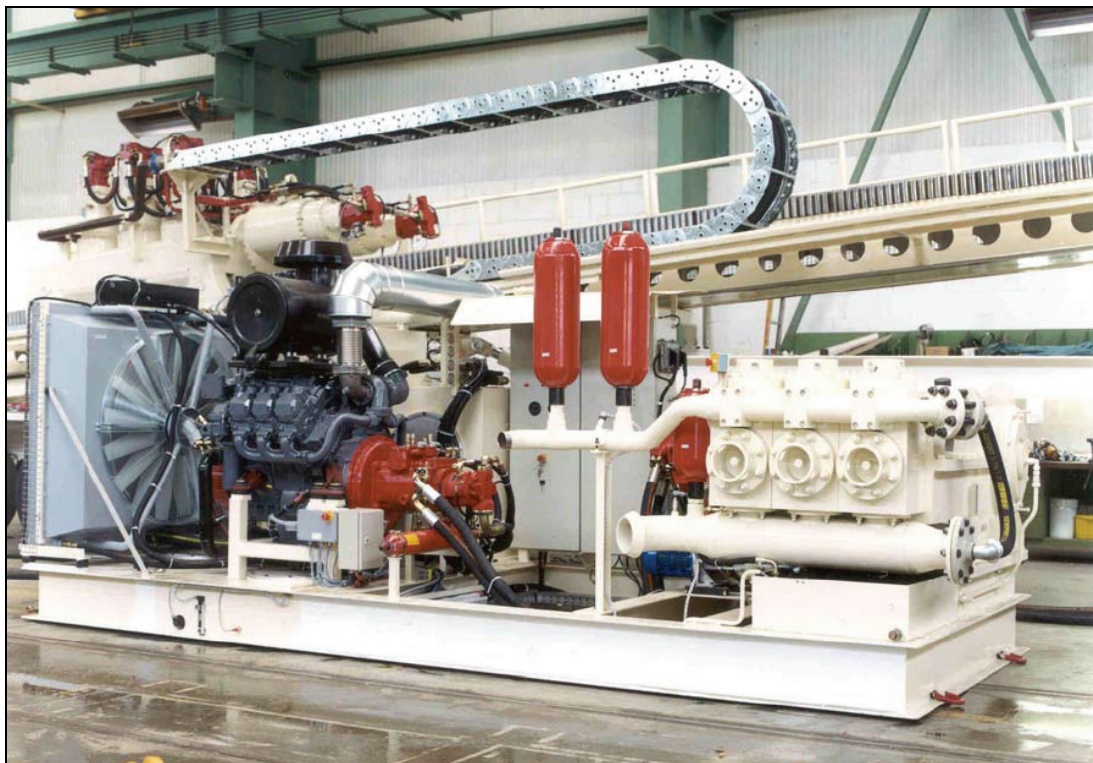


Abb. 2-7: Dieselhydraulische Hochdruck-Spülpumpe (Leistung ca. 330 kW) [39]

Zur Herstellung der Bohrspülung wird Frischwasser benötigt, das von der Wasserpumpe zur Mischanlage gefördert werden muss. Je nach Anforderung, insbesondere bei Spülungsverlusten, werden hierfür große Wassermengen benötigt, die von der Pumpe aufgebracht werden müssen (bis zu 4 m<sup>3</sup>/min).

### **BOHRSPÜLUNGSMISCHANLAGE**

Die Bohrspülmischanlage dient der Herstellung des Spülungsmediums. In der Regel wird die Spülung aus Wasser und Bentonit (quellfähigen Tonmineralen) sowie ggf. chemischen oder natürlichen Zusatzstoffen angemischt. Durch die Wahl des Mischungsverhältnisses kann

das Spülmedium an die spezifischen bohrtechnischen und bodenphysikalischen Erfordernisse angepasst werden.

In der Mischanlage wird das feinkörnige bzw. pulverförmige Bentonit mittels spezieller Mischapparaturen (Zellenradschleuse und Dosierschnecke) dem Basismedium (Wasser) zugemischt. Dadurch wird die Tragfähigkeit der Suspension, d.h. die Fähigkeit des zirkulierenden Mediums, beim Bohrvortrieb gelöstes Bohrklein aufzunehmen und abzutransportieren, erhöht. Auf die Eigenschaften und Funktionen der Bohrspülung wird in Kapitel 3.5 detaillierter eingegangen.

Häufig werden die Mischeinrichtungen in Kombination mit einem Vorratstank auf genormte 20 - oder 40“ Containermaße aufgebaut. Die Tanks sind mit Rührwerken ausgestattet, um die angemischte Bohrspülung in Bewegung zu halten, den Quellprozess zu unterstützen und eine Sedimentation der Festbestandteile zu verhindern.

### **SPÜLUNGSRECYCLINGANLAGE**

In der Recyclinganlage (auch Aufbereitungsanlage) wird der rücklaufende, mit Bohrkleinpartikeln beladene Spülungsstrom gereinigt, bevor die Spülung erneut dem Kreislauf zugeführt wird.

Bei Verwendung einer reinen Wasserspülung kann die Abtrennung von Feststoffpartikeln auf einfache Weise durch die Verwendung von Absetzbehältern erfolgen. Insbesondere bei HDD-Großprojekten und bei Verwendung von Ton-Wasser-Suspensionen sind dagegen spezielle, leistungsfähige Separieranlagen erforderlich, deren Aufbereitungskapazität (bis zu 240 m<sup>3</sup>/h) dem erforderlichen Spülungsvolumenstrom angepasst sein muss, um Verluste zu vermeiden.

Zur Trennung der unterschiedlichen Kornfraktionen bestehen Recyclinganlagen aus verschiedenen Separiervorrichtungen wie Schüttelsieben, Desander, Desilter und Zentrifugen.



Abb. 2-8: Recyclinganlage für Bohrspülung [39]

### BOHRSTRANG UND BOHRWERKZEUGE

Der Bohrstrang setzt sich aus dem Bohrgestänge, dem Bohrwerkzeug und ggf. Komplettierungselementen zusammen. Abb. 2-9 zeigt schematisch den prinzipiellen Aufbau eines Bohrstrangs, wie er zur Herstellung einer Pilotbohrung Anwendung findet.

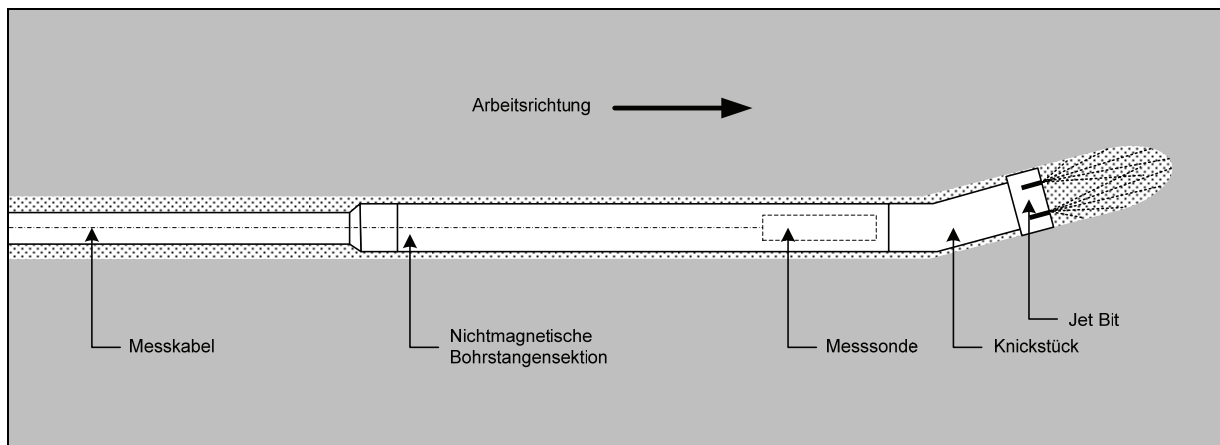


Abb. 2-9: Schematische Darstellung eines Bohrstrangs zur Herstellung einer Pilotbohrung

Das Bohrgestänge dient der Übertragung der Vorschubkräfte und des Drehmomentes auf das Bohrwerkzeug beim Vortrieb sowie der Übertragung der Zugkräfte während des Räum- und Einziehvorgangs. Darüber hinaus erfolgt durch den Bohrstrang die Zuleitung der Bohrflüssigkeit zu den Meißeldüsen unter hohem Druck.



Das Gestänge, dessen bohrgeräteseitiges Ende mit dem Kraftdrehkopf verbunden ist, muss derart dimensioniert sein, dass die maximal zu erwartenden Belastungen aufgenommen werden können. Die mechanischen Belastungsparameter setzen sich dabei zusammen aus:

- einer axialen Druckbelastung durch die Vorschubkraft während der Pilotbohrung,
- einer Torsionsbelastung durch die Rotationsbewegung des Kraftdrehkopfes,
- einer axialen Zugbelastung beim Zurückziehen des Bohrstranges während des Aufweit- und Einziehvorganges,
- einer Biegebeanspruchung während des Durchhörterns bzw. Durchziehens des Bohrstranges durch abgelenkte Bohrlochbereiche sowie
- einer Beanspruchung durch den Innendruck des Spülungsmediums.

Verfahrenscharakteristisch bzgl. des Transports der Bohrspülung ist beim HDD-Verfahren der sog. direkte Spülungskreislauf. Hierbei wird die Bohrflüssigkeit durch den Bohrstrang zum Meißel gepumpt, wo er an Düsen gebündelt austritt und anschließend im Ringraum zwischen Bohrgestänge und Bohrlochwand mit Bohrklein beladen zurück zur Bohranlage geführt wird.

Hinsichtlich der Bohrwerkzeuge kann eine generelle Unterscheidung beispielsweise anhand der Teilvorgänge beim HDD vorgenommen werden:

- Bohrwerkzeuge für die Erstellung der Pilotbohrung und
- Bohrwerkzeuge für die Aufweitbohrung.

In weichen und locker gelagerten Erdformationen erfolgt das Lösen des anstehenden Bodens vorwiegend hydraulisch. Bohrwerkzeuge für Pilotbohrungen sind daher im Allgemeinen als Flachmeißel ausgeführt und mit Spüldüsen ausgestattet (sog. Jet Bits, Düsenmeißel). Da zusätzlich auch eine mechanische Zerkleinerung des anstehenden Materials stattfindet, sind die Bohrmeißel mit Hartmetallschneiden, -stiften oder Verschleißschweißnähten bestückt. Bei HDD-Bohrungen im Festgestein erfolgt ausschließlich ein mechanisches Auslösen des anstehenden Materials aus dem Gesteinsverband. Hierfür kommen Rollenmeißel zum Einsatz.

Abb. 2-10 zeigt exemplarisch eine gängige Meißelbauform in Form eines Düsenmeißels (Jet Bits) zur Erstellung einer Pilotbohrung im Lockergestein.



Abb. 2-10: Düsenmeißel (Jet Bit) zur Herstellung der Pilotbohrung

Zur Steuerung des Bohrlochverlaufs werden entweder Knickstücke unmittelbar hinter dem Bohrwerkzeug in den Bohrstrang eingebaut oder spezielle Meißelformen mit asymmetrischem Aufbau verwendet. Letztere besitzen an der Meißelspitze eine geneigte Steuerplatte, über die der Bohrmeißel beim Einstellen der Rotationsbewegung in die gewünschte Richtung gleitet und abgelenkt wird.

Für den Aufweitvorgang sind, je nach Beschaffenheit des zu durchörternden Untergrunds, verschiedene Werkzeuge in Anwendung, die wie folgt unterteilt werden können:

- **Barrel Reamer** (Fassräumer). Verwendung hauptsächlich in sandigen Böden. Der überwiegende Teil der Lösearbeit des anstehenden Bodens erfolgt hydraulisch mittels an der Stirnseite des Räumers integrierter Düsen (Jets).
- **Fly Cutter**. Anwendung bei mittelharten und mitunter auch tonigen Gesteinsformationen. Die Lösearbeit erfolgt in etwa zu gleichen Teilen hydraulisch und mechanisch. Ein positiver Nebeneffekt beim Einsatz von Fly Cuttern ist der geringere Widerstand, den das Werkzeug, bauartbedingt, der zirkulierenden Bohrspülung entgegensetzt. Von Nachteil ist die geringere Richtungsstabilität gegenüber den Barrel Reamern; aus diesem Grund werden großen Fly Cuttern häufig Barrel Reamer vor- oder nachgeschaltet.

- **Hole Opener.** Einsatz in harten Gesteinsformationen. Das Gestein wird mechanisch aus dem Gebirgsverband gelöst. Diese Werkzeuge ähneln den in der Tiefbohrtechnik verwendeten Rollenmeißeln.

Abb. 2-11 zeigt die o.g. Bauformen von Räumwerkzeugen.



Abb. 2-11: Räumwerkzeuge, links: Barrel Reamer, Mitte: Fly Cutter, rechts: Hole Opener [39]

Das erforderliche Bohrlochkaliber richtet sich in erster Linie nach dem Durchmesser der einzuziehenden Rohrleitung. In der Regel wird das Bohrloch um den sog. Überschnittfaktor von 1,3 bis 1,5 größer dimensioniert. Der Überschnittfaktor beschreibt das Verhältnis von Bohrlochdurchmesser zu Pipedurchmesser.

Für den letzten Arbeitsgang eines HDD-Projektes, dem Einziehen der Produktrohrleitung in die fertig aufgeweitete Bohrung, kommen spezielle Einziehgarnituren (engl. Pullback Assembly) zum Einsatz. Hierzu gehören im Wesentlichen, wie aus Abb. 2-12 ersichtlich, der Räumer, der Gelenkverbinder, der Drehwirbel, der Schäkel und der Einziehkopf.

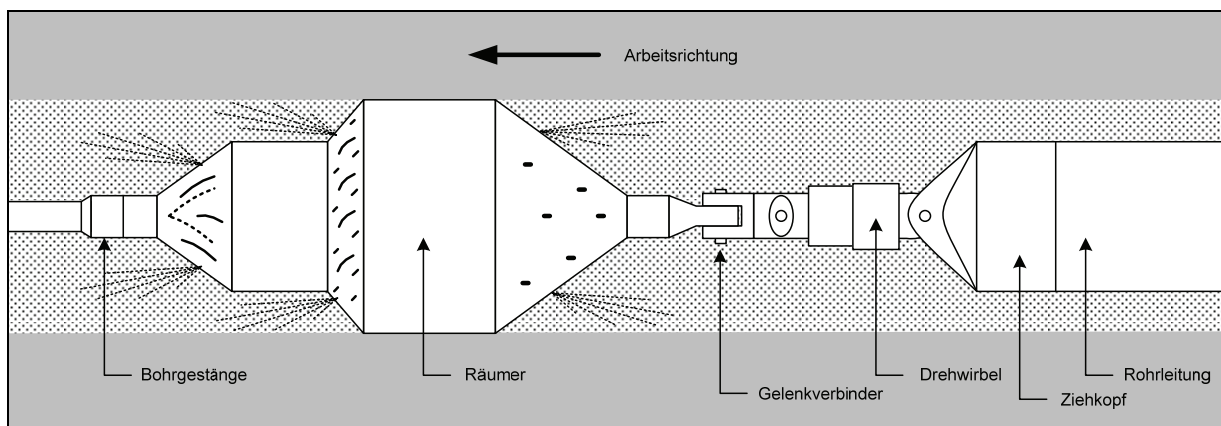


Abb. 2-12: Schematische Darstellung einer Einziehgarnitur beim HDD

Besondere Bedeutung kommt in dieser Zusammenstellung dem Drehwirbel zu, der die Aufgabe hat, einerseits die Zugkraft beim Einziehvorgang zu übertragen und andererseits die Rotationsbewegung bzw. das Drehmoment des Bohrgestänges von der einzuziehenden Rohrleitung zu entkoppeln.

### 2.3 Rohrbau

Einen wesentlichen Teilvorgang bei HDD-Projekten stellt der Rohrbau dar, dessen konstruktive Elemente u.a. aus dem Produktrohr selbst, der Rollenbahn und dem Oberbogen bestehen. Bei den parallel zum Bohrvorgang stattfindenden Rohrbauarbeiten wird die Pipeline für den Einziehvorgang in das Bohrloch vorbereitet. Hierfür werden die einzelnen Rohrsegmente zu einem einzelnen Strang, der im offenen Gelände auf einer zuvor hergerichteten Trasse ausgelegt wird, verbunden (verschweißt).

#### ROLLENBAHN

Zur Reduzierung der Reibungswiderstände beim Einziehen der gesamten Pipeline wird der vorbereitete und geprüfte Rohrstrang auf Rollenböcken entlang der Rohrtrasse gelagert. Dabei muss ein bestimmter Maximalabstand zwischen den einzelnen Rollenböcken eingehalten werden, um eine unzulässig hohe Biegebeanspruchung des Rohrmaterials zu verhindern.



Abb. 2-13: Vorbereiteter und auf Rollenböcken gelagerter Rohrstrang



### OBERBOGEN

In der Zielgrube einer Horizontalbohrung tritt der Bohrstrang unter einem bestimmten Winkel aus dem Erdreich an der Tagesoberfläche aus. Um beim Einziehen der Rohrleitung in das Bohrloch keine Knicke im Rohrstrang zu verursachen, muss die Rohrleitung in einem geeigneten Bogen, dem sog. Oberbogen, geführt werden. Dabei dürfen keine unzulässigen Biegespannungen im Material auftreten. Diese Vorgaben werden erreicht, indem die Rollenböcke im Bereich des Oberbogens auf entsprechend hohen Podesten aufgebaut werden.

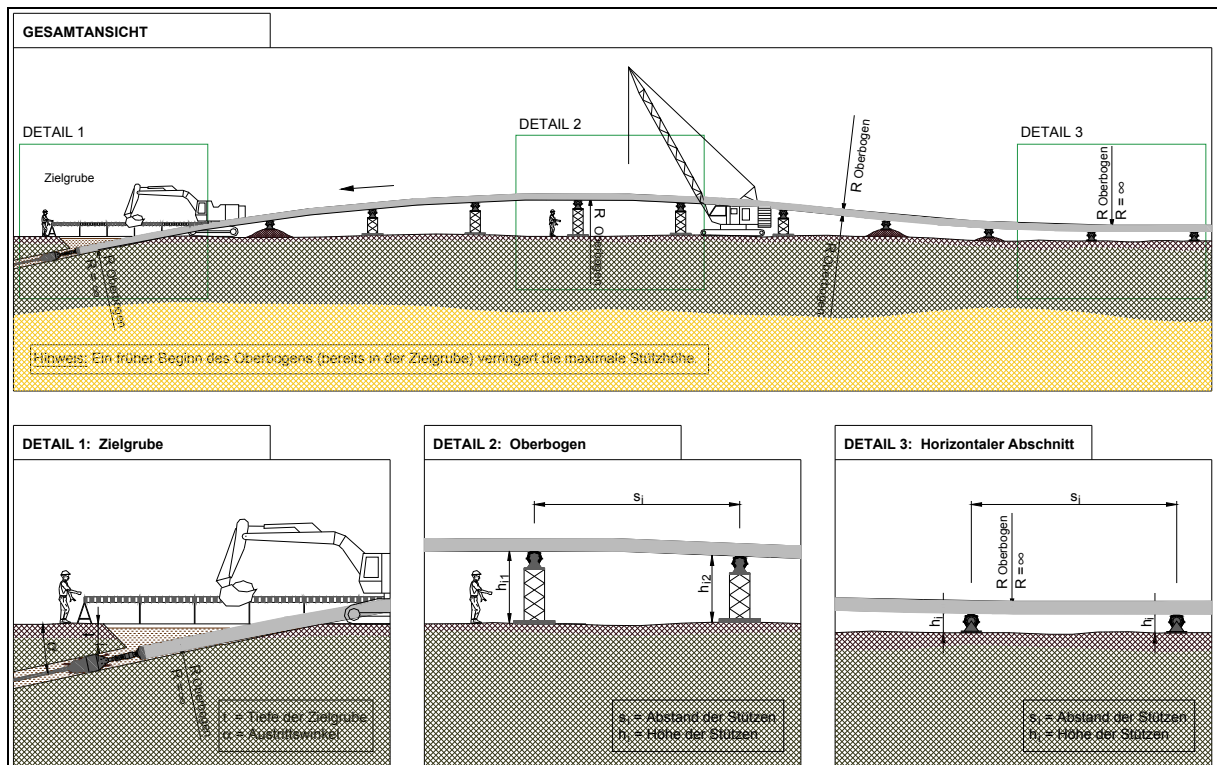


Abb. 2-14: Prinzipieller Aufbau eines Oberbogens [77]

### 2.4 Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit des HDD

Nach aktuellem Stand der Technik können mit dem HDD-Verfahren Bohrungslängen von bis zu 2.300 m und Bohrdurchmesser bis maximal ca. 1.800 mm in einem Zuge hergestellt werden, wobei sich jedoch die genannten geometrischen Grenzwerte nicht gleichzeitig realisieren lassen. Generell gilt, dass mit zunehmendem Bohrlochdurchmesser die realisierbare Bohrungslänge abnimmt und umgekehrt. So sind beispielsweise die maximalen Bohrungslängen bei sehr großen Bohrlochkalibern verfahrenstechnisch bedingt auf ca. 1.000 m begrenzt. Darüber hinaus erfordert die Steigerung des Bohrungs- bzw. Rohrdurchmessers zunehmend größere Mindestbohrungslängen.

Der aktuelle Längenrekord einer erfolgreichen Horizontalbohrung (in einem Zug) liegt bei 2.308 m, der im Jahr 2001 in China mit einem 10“-Stahlrohr erzielt wurde. Noch größere Bohrungslängen können durch das zielgenaue Zusammenführen zweier gegenüber liegender Bohrungen erreicht werden (sog. „Meeting-in-the-Middle“-Verfahren).

Nachstehende Abb. 2-15 zeigt die realisierbaren Rohrverlegeleistungen beim HDD bei üblicher Verfahrensweise in Abhängigkeit der geometrischen Parameter ‚Pipedurchmesser‘ und ‚Rohr- bzw. Bohrungslänge‘.

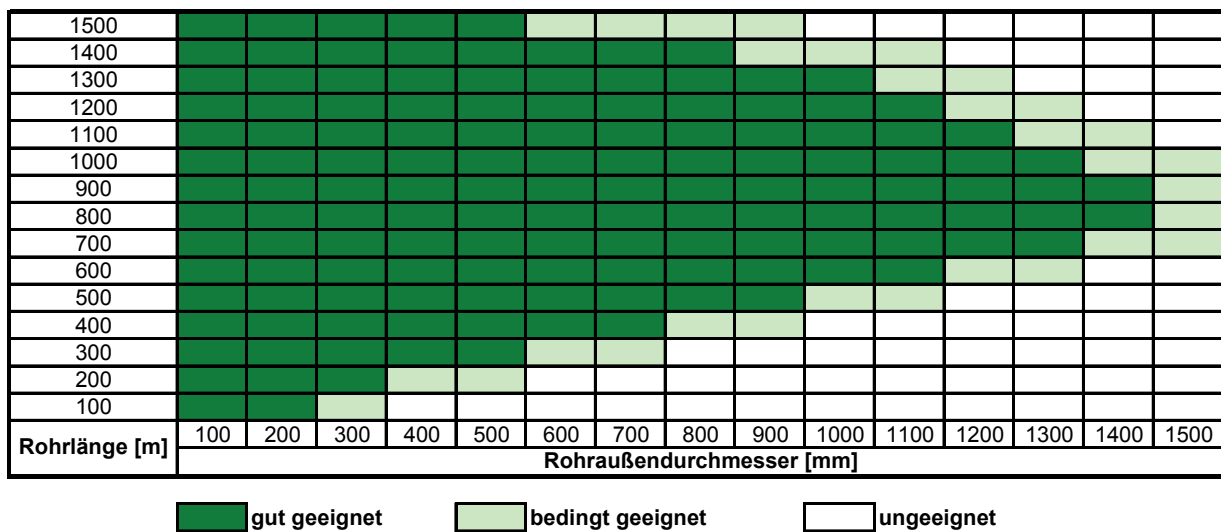


Abb. 2-15: Verlegeleistung des HDD-Verfahrens in Abhängigkeit von Rohrdurchmesser und Rohrlänge [39]

Die reine Rohrverlegeleistung beim HDD kann als Richtwert mit ca. 5 - 20 m/h angegeben werden. Die relativ hohe Leistungsspanne resultiert aus der starken Abhängigkeit der Leistung vom Rohrdurchmesser, d.h. je größer der Pipe-Durchmesser, desto geringer die Verlegeleistung pro Zeiteinheit.

Neben den geometrischen Faktoren stellen vor allem geologische bzw. geophysikalische Aspekte des Baugrunds eine Leistungsbegrenzung dar. Das HDD-Verfahren ist grundsätzlich sowohl für den Einsatz in oberflächennahen Lockergesteins- als auch in Festgesteinsformationen geeignet.

Bei den Lockergesteinen eignen sich vor allem feinkörnige, sandige und bindige Bodenarten, wie beispielsweise Ton, Schluff oder Sand. Derartige Bodentypen gewährleisten eine gute hydraulische Lösbarkeit durch das Bohrwerkzeug und zeigen eine hohe Bohrlocheigenstabilität. Steinige, rollige Böden mit geringen bindigen Bestandteilen, wie beispielsweise Kies oder Schotter, limitieren die Anwendung des HDD-Verfahrens, da sich während des Bohrprozesses häufig schwierige Bohrlochbedingungen einstellen, die sich auch

bei Verwendung von Schwerspülungen zur Stützung des Bohrkanals und zum Abtransport des gelösten Bodenmaterials als nicht beherrschbar darstellen [37].

Bei der Anwendung der HDD-Technik in Festgesteinsformationen bestehen die Einsatzgrenzen bei Gesteinsfestigkeiten  $> 250$  MPa sowie bei stark abrasiven und klüftigen Gebirgskonditionen. Während harte und abrasive Gesteine vor allem die Bohrwerkzeuge mechanisch belasten (erhöhter Verschleiß), besteht die Hauptproblematik bei einem geklüfteten Gebirgsaufbau in dem Auftreten von Spülungsverlusten.

Die Beschaffenheit des Baugrunds hat, neben einer deutlichen Erhöhung des Baurisikos, einen entscheidenden Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit, d.h. die Kosten eines HDD-Vorhabens. Je ungünstiger die im Trassenbereich vorherrschenden geologischen Bedingungen sind, desto höhere Kosten müssen für die Realisierung des Projektes veranschlagt werden.

Eine allgemeingültige Aussage zur Kostenberechnung eines HDD-Projekts gestaltet sich schwierig, da sehr viele, jeweils projektspezifische Einflussparameter Berücksichtigung finden müssen. Als grober Richtwert kann lediglich eine konstruierte Abhängigkeit von Bohrungslänge und Rohrdurchmesser von etwa 0,25 - 1,5 €/m/mm angegeben werden. Die reinen Bohr- und Verlegekosten würden sich demnach beispielsweise für eine DN600 Stahlpipe und eine Bohrungslänge von 500 m in einer Kostenspanne zwischen 75.000 und 450.000 € bewegen [39].

### **2.5 Dimensionierung und Auswahl geeigneter Bohrgeräte**

Die Dimensionierung der Bohranlage spielt bei der Planung von HDD-Projekten eine entscheidende Rolle, da die Gerätegröße einerseits aus energetischer Sicht einen großen Einfluss auf die Gesamtkosten des Vorhabens nimmt und andererseits das Risiko des Festwerdens des Produktrohres während des Einziehvorgangs durch eine ausreichende Gerätegröße minimiert werden muss. In der Praxis hat sich eine Einteilung der Bohrgerätegröße nach der maximalen Zugkraft des jeweiligen Gerätes durchgesetzt (s. Kap. 2.2, Tab. 2-1).

Die Dimension einer HDD-Bohranlage wird in erster Linie durch die zu erwartenden Zugkräfte beim Einziehen des Rohrstrangs bestimmt. Diese werden hauptsächlich determiniert durch die geometrischen Randparameter der Bohrung bzw. der einzuziehenden Pipeline (Rohrlänge und -durchmesser) sowie durch baugrundspezifische Aspekte.

Die technischen Richtlinien des DCA unterscheiden zwischen Zugkräften, die direkt am Einziehkopf erforderlich werden, um die an der Rohrmantelfläche entstehenden Reibungskräfte zu überwinden und Zugkräften, die von der Bohranlage insgesamt aufgebracht werden müssen. Die Zugkraftdifferenz ergibt sich aus den Reibungskräften zwischen

Bohrlochwand und Bohrgestänge einschließlich Räumwerkzeug. Mit fortschreitendem Einziehvorgang nimmt die Zugkraft am Ziehkopf, bedingt durch die kontinuierliche Steigerung der Reibkräfte zwischen Rohrleitungsoberfläche und Bohrlochwand bzw. Spülung zu. Obwohl theoretisch die Berechnung der Zugkraft mittels leistungsfähiger EDV-Programme möglich ist, kann aufgrund der nicht erfassbaren technischen Randbedingungen bei der Realisierung eines HDD-Projektes hieraus keine direkte Bestimmung der Bohrgerätegröße vorgenommen werden. Erfahrungsgemäß wird die Anlage auf die zwei- bis dreifache theoretisch errechnete Zugkraft dimensioniert.

Zur Ermittlung der erforderlichen Zugkraft werden in der Literatur beispielsweise die Niederländische Norm NEN 3651 und die amerikanische AGA-Methode vorgeschlagen. Ein auf empirischer Basis formulierter rechnerischer Ansatz wurde von LÜBBERS & KOEGLER (2001) als Faustformel entwickelt, der häufig zur Abschätzung der Zugkraft Verwendung findet (2.1) [38].

$$(2.1) \quad F_{Rig} = (L + D - K) \cdot X$$

darin sind

$F_{Rig}$	=	Zugkraft der Bohranlage [kN]
$L$	=	Bohrungslänge [m]
$D$	=	Pipedurchmesser [mm]
$K$	=	Korrekturfaktor (Erfahrungswert) [-]
$X$	=	Baugrundfaktor [-]
		Gut geeignete Böden $X = 0,5$
		Normale Böden $X = 1,0$
		Schwierige Böden $X = 1,5$

Neben dieser rechnerischen Methode kann die erforderliche Bohrgerätegröße in Abhängigkeit von Rohrdurchmesser und Bohrungslänge auch anhand von grafischen Darstellungen, wie in Abb. 2-16 gezeigt, ermittelt werden.



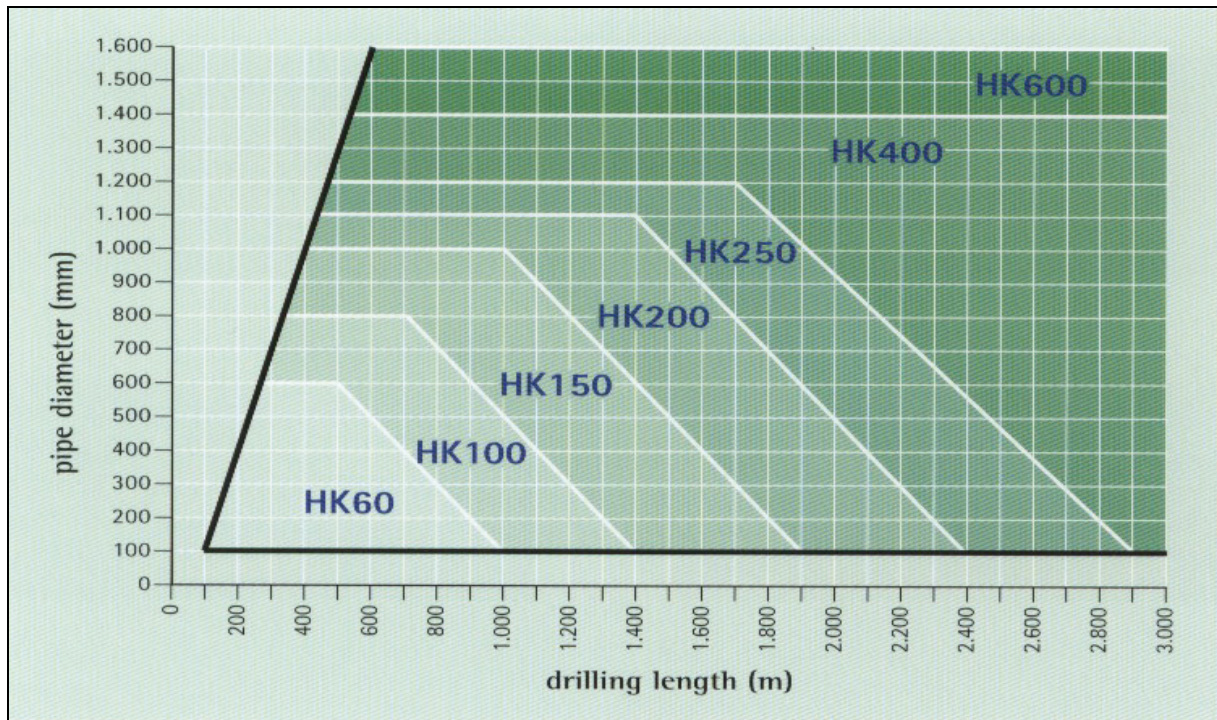


Abb. 2-16: Grafische Ermittlung der geeigneten Bohranlagengröße in Abhängigkeit von Rohrdurchmesser und Bohrungslänge [39]

## 2.6 Risikoschwerpunkte beim HDD

Die gesteuerte Horizontalbohrtechnik ist trotz seiner Etablierung als leistungsfähiges Verfahren zur grabenlosen Verlegung von Rohrleitungen nicht von Rückschlägen verschont geblieben.

Kennzeichnend für das HDD-Verfahren ist, dass es praktisch keine verwertbaren Teilleistungen gibt, die mit dem Auftraggeber abgerechnet werden können. Vielmehr wird der Gesamterfolg erst am Ende des Projektes, nämlich nach dem erfolgreichen Einziehen des Produktrohres, deutlich.

Tritt während eines HDD-Projektes, respektive beim Einziehvorgang, eine Havarie der Rohrleitung auf, so ist der wirtschaftliche Schaden umso größer, je später dies der Fall ist. In der Praxis werden im Schadensfall große technische Aufwendungen betrieben, um die Pipeline und damit das Projekt zu retten, zuweilen auch unter Vernachlässigung sicherheitlicher Aspekte (Abb. 2-17). Im ungünstigsten Fall muss die Bohrung aufgegeben werden, was mit großen wirtschaftlichen Verlusten verbunden ist.



Abb. 2-17: Rettungsversuch einer feststeckenden Pipeline mit Bergungskränen [36]

Trotz einer fast 300%igen Sicherheit bei der Dimensionierung des Bohrgerätes kommt es während des Einziehvorganges der Pipeline zu charakteristischen Schadensfällen, die im Wesentlichen zwei Gruppen zugeordnet werden können:

- **Fehlerhafte Einziehgarnitur** - Dieser Schadensfall betrifft vor allem den Drehwirbel und den Schäkel bzw. Gelenkverbinder zwischen Ziehkopf und Räumwerkzeug. Während des Einziehvorgangs kommt es zum Versagen besagter Bauteile durch Überschreiten der Materialfestigkeit.
- **Festwerden des Rohrstranges** - In diesem Fall können die erforderlichen Zugkräfte vom Bohrgerät nicht mehr aufgebracht werden, da die tatsächlich auftretende Zugkraft die maximale Zugkraft des Bohrgerätes übersteigt, womit der weitere Einziehfortschritt zum Erliegen kommt.

Unter dem Begriff „Festwerden“ wird definitionsgemäß die unerwünschte und/oder unvorhersehbare Zugkraftzunahme während des Einziehvorganges verstanden. Ein schlagartiger Zugkraftanstieg kann sich beispielsweise dann ergeben, wenn Teilbereiche des Bohrkanals einstürzen. Eine besonders kritische Lokalität ist hierbei der Bereich der Einziehgarnitur aufgrund seines i.d.R. geringeren Durchmessers gegenüber dem Produktrohr. Ein Bohrlocheinsturz führt hier zu einer ‚Verkeilung‘ des Erdreichs (häufig in kiesigen, nicht

standfesten Bodenformationen); in diesem Fall kann die Rohrleitung u.U. weder vor- noch zurückgezogen werden.

Demgegenüber steht der Fall eines überproportionalen kontinuierlichen Zugkraftanstiegs während des Einziehvorgangs, was ebenfalls dazu führen kann, dass die maximale Zugkraft der Bohranlage überschritten wird und es infolge dessen zu einem Festwerden der Rohrleitung kommt. Dieser Schadensverlauf ist häufig in tonigen Böden (Bohrlochverengung infolge quellender Tone oder mangelhafter Bohrkleinaustrag) zu beobachten.

Unabhängig von der Definition der Schadensfälle ist die Ursache stets in den zu gering kalkulierten Reibungskräften begründet. Neben dem Eigengewicht, der Art der Ummantelung sowie dem Durchmesser und der Länge der Rohrleitung nehmen der geometrische Verlauf der Bohrachse, die Einziehgeschwindigkeit und vor allem ein schlechter Bohrlochzustand Einfluss auf den überproportionalen Zugkraftanstieg während des Installationsvorgangs [37].

Abb. 2-18 zeigt exemplarisch den typischen Verlauf von Zugkraftwerten während des Einziehens einer Rohrleitung. Wie daraus ersichtlich, sind hierbei zu unterscheiden:

- ein plötzlicher überproportionaler Zugkraftanstieg (Zugkraftkurve a), der auf einen partiellen Zusammenfall des Bohrkanals hindeutet, und
- ein kontinuierlicher Anstieg der Zugkraft über den gesamten Einziehvorgang (Zugkraftkurve b).

Letzterer Fall lässt auf einen allgemein schlechten Bohrlochzustand schließen, wobei eine schlechte Bohrlochreinigung zu einer Verengung des Ringraums und damit zu einer permanenten Erhöhung der Reibungskräfte geführt hat.

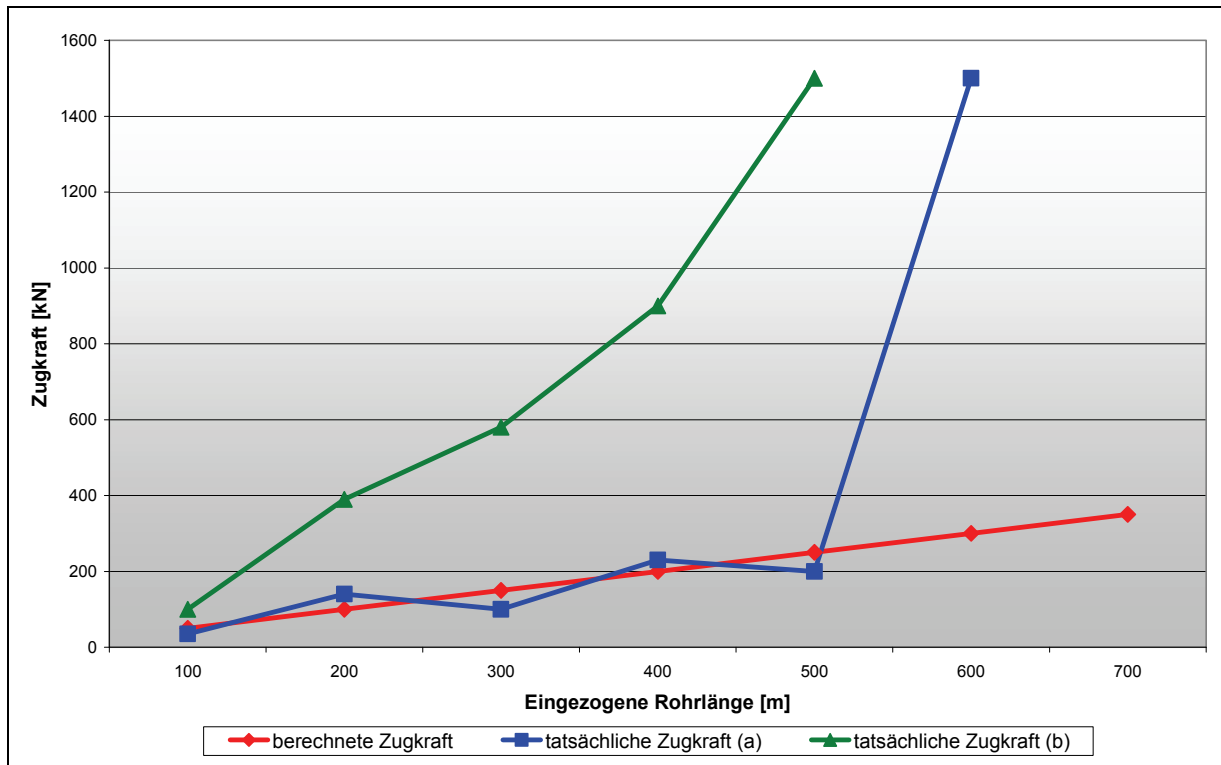


Abb. 2-18: Typische Zugkraftverläufe während des Einziehens einer Rohrleitung [39]

Der Erfolg eines mittels HDD vorgetriebenen Produktrohres hängt somit wesentlich von der Beherrschung des Baugrundes ab. Das Baugrundrisiko resultiert aus einer Vielzahl von Ursachen, die hauptsächlich auf die geotechnische Beschaffenheit des zu durchörternden Untergrundes zurückzuführen sind. Qualitativ kann dieses Risiko, das sich multiplikatorisch aus dem Schadensausmaß und der Schadenswahrscheinlichkeit zusammensetzt, im Ansatz erfasst werden. Die Quantifizierung des Risikos bereitet jedoch aufgrund von Unsicherheiten bzw. Unwägbarkeiten im Hinblick auf die Baugrundverhältnisse Schwierigkeiten. Die erfolversprechende HDD-Projektierung und -durchführung erfordert daher eine möglichst exakte Kenntnis des Untergrundes bzgl. der vorherrschenden Materialeigenschaften und Modellbildung des Baugrunds sowie der hierfür maßgeblichen technischen Randbedingungen, wie beispielsweise Ausführungsart, Bohrungsgeometrie und Anlagendimensionierung. Nicht zuletzt sind Aspekte der Ausführungsqualität und der messtechnischen Überwachung zu berücksichtigen [2], [11], [37].



### 3 Physikalische und geophysikalische Grundlagen

Zum allgemeinen Verständnis der komplexen Vorgänge bei der Realisierung von HDD-Projekten, insbesondere im Zusammenhang mit dem beabsichtigten Einsatz der Vibrationstechnologie, sollen im folgenden Kapitel einige relevante Grundlagen und Basisgrößen der Schwingungstechnik und Bodenphysik dargestellt werden

Die Berücksichtigung physikalischer Faktoren und Zusammenhänge dient später der Interpretation der Versuchsergebnisse, woraus letztlich Lösungsansätze für das ‚Vibrationsverfahren‘ entwickelt werden.

[8],[13],[16],[22],[23],[26],[33],[42],[44],[46],[50],[51],[57],[59],[63],[65],[66],[71],[72],[75],[82]

#### 3.1 Kenngrößen der Rotationsschwingungen

Das im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit betrachtete System zur Erregung mechanischer Schwingungen folgt den mathematisch-physikalischen Gesetzmäßigkeiten eines Kreisschwingers.

Ein Kreisschwinger besteht im Wesentlichen aus einer rotierenden Welle mit einer darauf außermittig angeordneten Unwuchtmasse. Aus der schnellen Rotation der Masse resultiert eine um 360° umlaufende Fliehkraft mit ungerichteten Schwingungen, die als harmonische Schwingungszustände beschrieben werden können [16].

Zur Beschreibung der Rotationsschwingungen können die Grundlagen der Dynamik, speziell der Kreisbewegungen, herangezogen werden. Eine elementare Kenngröße stellt die Frequenz  $f$  der rotierenden Welle dar, also die pro Zeiteinheit  $t$  erreichte Anzahl der Umdrehungen  $n$ :

$$(3.1) \quad f = \frac{n}{t} \quad [Hz = s^{-1}]$$

In Abhängigkeit der Drehzahl bzw. Frequenz ergibt sich daraus die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  der rotierenden Masse zu

$$(3.2) \quad \omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad [s^{-1}].$$

Die Leistung des Schwingungserregers wird entscheidend durch die integrierte Unwuchtmasse  $m_U$  bestimmt. Der Schwerpunkt dieser Masse ist um den Betrag der Exzentrizität  $e$  von der Rotationsachse verschoben. Das Produkt beider Größen bildet das Unwuchtmoment  $M_e$ , das auch als Exzentermoment bezeichnet wird.

$$(3.3) \quad M_e = m_U \cdot e \quad [kg \cdot m]$$

Aus den genannten Basisgrößen der Kreisbewegung errechnet sich die Zentrifugalkraft  $F_Z$ , die die erreichbare Amplitude der Schwingung bestimmt:

$$(3.4) \quad F_Z = m_U \cdot e \cdot \omega^2 \quad [N]$$

### 3.2 Schwingungsverhalten von Rohrleitungen

#### ALLGEMEINES

Das Schwingungsverhalten von Rohrleitungen unterliegt, insbesondere im Hinblick auf die dem Forschungsprojekt zugrunde liegende Problemstellung, komplexen Zusammenhängen, so dass sich eine mathematisch-physikalische Beschreibung als sehr schwierig gestaltet. D.h. die Erfassung und rechnerische Beschreibung Einfluss nehmender Randbedingungen und Zustandsgrößen muss sich auf einfache Modellvorstellungen beschränken; eine exakte und realitätsgetreue Abbildung des Schwingungszustands einer (erdgebetteten) Rohrleitung unter Berücksichtigung aller Randparameter ist aufgrund der Komplexität des Gesamtsystems nahezu nicht möglich bzw. nur unter großem rechnerischen Aufwand, und selbst dann auch nur unvollständig, zu erfassen.

Einige grundlegende schwingungsmechanische Zusammenhänge bei Rohrleitungen seien im Folgenden ansatzweise beschrieben und erläutert. Dem Schwingungsverhalten von Rohren kommt bezüglich des vorliegenden Forschungsprojektes aus zweierlei Hinsicht eine Bedeutung zu: Erstens interessiert in diesem Zusammenhang die Effektivität des Schwingungseintrags in die zu installierende Rohrleitung in Bezug auf die beabsichtigte Zugkraftreduzierung, und zweitens die Frage, ob Schwingungen einen Einfluss auf die Materialeigenschaften bzw. -festigkeit des Rohres nehmen.

Das Verhalten von Rohrleitungen unter dem Einfluss von Schwingungen unterliegt einer Vielzahl von Faktoren. Entscheidenden Einfluss nehmen einerseits die Form und Art der schwingungsmechanischen Anregung, und andererseits die Lagerungsbedingungen und Einspannverhältnisse (Randbedingungen) des schwingfähigen Systems. Der Resonanzzustand kennzeichnet als wichtige Kenngröße das Schwingungsverhalten eines Rohres bzw. einer Rohrleitungsstruktur. Er wird bestimmt durch die Eigenmoden des Systems, die wiederum von geometrischen Faktoren und Materialkennwerten abhängen.

Bei dreidimensionalen Rohrleitungssystemen treten unter dem Einfluss von Schwingungen, neben Längs- und Torsionsschwingungen, vor allem Biegeschwingungen auf. Letztere wirken dominierend auf die Eigenform der jeweiligen Eigenschwingungen und besitzen die größte Relevanz bei der Grundlagenbetrachtung zum Schwingungsverhalten von Rohrleitungen bzgl. der im Rahmen der Forschungsarbeiten betrachteten Problemstellung.

Bei den Rohrbiegeschwingungen können gemäß Abb. 3-1 drei verschiedene Gruppen unterschieden werden.

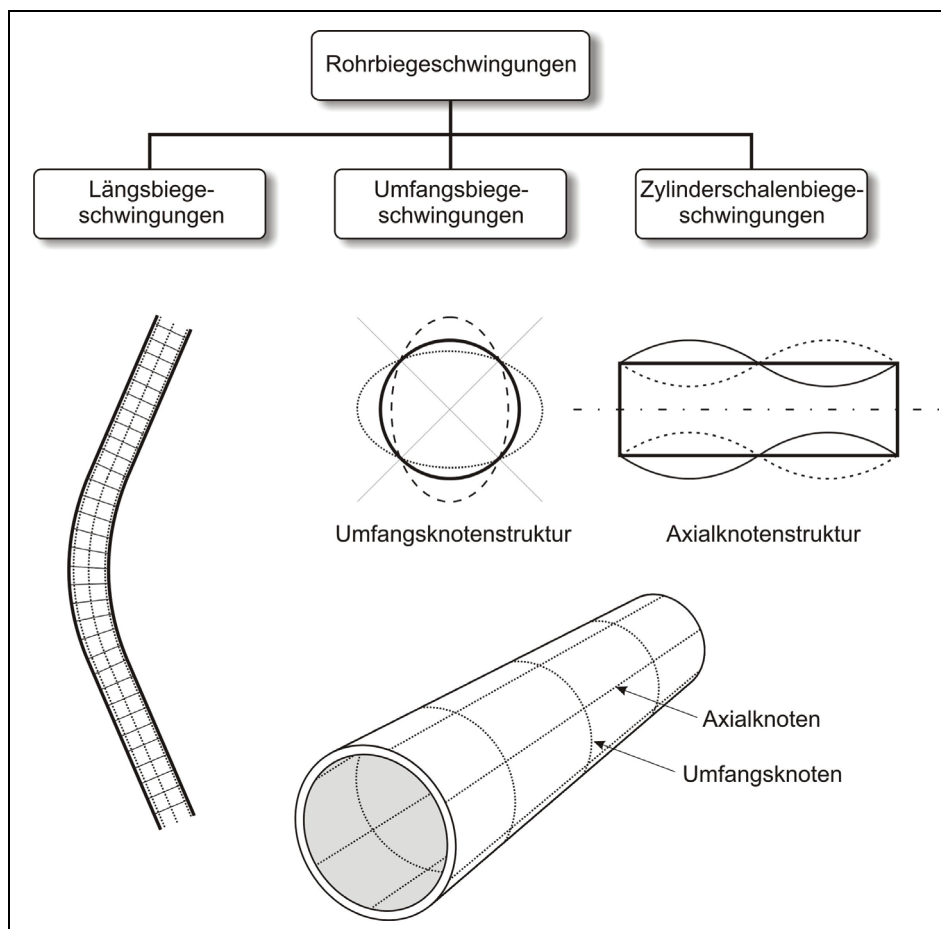


Abb. 3-1: Verschiedene Arten von Biegeschwingungen eines Rohres

Von besonderer Relevanz sind vor allem die Längsbiegeschwingungen, die ein Rohrsegment erfährt, wenn es durch einen äußeren Erreger (hier eine rohrinterne Vibrationszelle) zum Schwingen angeregt wird. Die entsprechenden Eigenfrequenzen des Gesamtsystems liegen häufig im Anregungsbereich des Schwingungsinitiators. Die Umfangsbiegeschwingungen bewirken am elastischen Rohrsegment - infinitesimal betrachtet - eine Ovalisierung des Rohrquerschnitts, während sich die Zylinderschalenbiegung longitudinal über einen gewissen Rohrabschnitt auswirkt.

Eine rechnerische Beschreibung des Schwingungsverhaltens von Rohren lässt sich in Analogie zur mechanischen Beanspruchung von Balkensystemen formulieren (s. Kap. 11).

Periodische Biegeschwingungen eines Balkensystems sind ein Spezialfall transversaler Wellen. Die orts- und zeitabhängige Auslenkung eines Biegebalkens (entspr. Biegelinie) kann durch eine homogene, partielle DGL vierter Ordnung beschrieben werden:

$$(3.5) \quad \frac{\rho A}{EI} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = 0$$

mit

- $\rho$  = Materialdichte [kg/m<sup>3</sup>]
- $A$  = Querschnittsfläche [m<sup>2</sup>]
- $E$  = Elastizitätsmodul [N/mm<sup>2</sup>]
- $I$  = Flächenträgheitsmoment [m<sup>4</sup>]
- $w$  = Durchbiegung, Auslenkung [m]

Durch Separation in eine Orts- und Zeitgleichung kann dieser Ansatz gemäß BERNOULLI gelöst werden (Produktansatz).

$$(3.6) \quad w(x, t) = W(x) \cdot T(t)$$

Die Trennung der Variablen liefert eine reine Orts- und Zeitgleichung; die Ortsgleichung lässt sich durch eine gewöhnliche DGL formulieren zu:

$$(3.7) \quad \frac{\partial^4 W}{\partial x^4} - \beta^4 W = 0 \quad \text{mit} \quad \beta = \sqrt[4]{\omega^2 \cdot \frac{\rho A}{EI}} \quad (\text{Eigenwert})$$



Die allgemeine Lösung dieser Beziehung lautet:

$$(3.8) \quad W(x) = A_1 \cdot \cos \beta x + A_2 \cdot \sin \beta x + A_3 \cdot \cosh \beta x + A_4 \cdot \sinh \beta x$$

Für die Zeitgleichung gilt als Lösung:

$$(3.9) \quad T(t) = A \cdot \cos \omega t + B \cdot \sin \omega t$$

Durch Einsetzen des Produktansatzes (3.8) in die Randbedingungen des Balkensystems, die von den Einspannverhältnissen abhängen, können die Konstanten  $A_i$  bestimmt werden. Daraus ergeben sich vier homogene, lineare Gleichungssysteme mit Koeffizienten, die von dem Eigenwert  $\beta$  abhängen und mit dem zugehörigen Eigenvektor  $[A_1 \ A_2 \ A_3 \ A_4]^T$  ein sog. Eigenwertproblem bilden. Für einfache Balkensysteme kann das Eigenwertproblem analytisch gelöst werden, entsprechend der Funktion

$$(3.10) \quad w(x, t) = W(x) \cdot (A \cdot \cos \omega t + B \cdot \sin \omega t)$$

Durch Einsetzen dieser Gleichung in die Anfangsbedingungen für den Schwingweg  $w(x, t=0)$  und die Schwinggeschwindigkeit  $w'(x, t=0)$  können die Konstanten A und B ermittelt werden. Die Eigenfrequenzen  $f_E$  des Balkens (analog: des Rohres) können nach Bestimmung der Eigenwerte berechnet werden zu

$$(3.11) \quad f_E = \frac{\lambda_F}{2\pi L^2} \cdot \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$$

Für die Eigenwerte  $\lambda_F$  ergeben sich in Abhängigkeit der Randbedingungen und der Geometrie des Rohres unterschiedliche Werte. Für einfache Rohrsegmente existieren Eigenwerte in tabellarischer Form, mit denen sich die Eigenfrequenzen einzelner Eigenschwingungsformen grob abschätzen lassen. Eine genauere Erfassung der Eigenformen bzw. Eigenfrequenzen von Rohrleitungen, unter Berücksichtigung diverser Randbedingungen, wie beispielsweise Bettungs- und Auflagerbedingungen, Dämpfungseffekten, Materialinhomogenitäten, geometrischem Verlauf des Rohrstranges etc., kann nur auf numerische Weise erfolgen [27],[30].

### DÄMPFUNGSEFFEKTE BEI ROHRLEITUNGSSCHWINGUNGEN

Bei der Simulation und Berechnung von Rohrleitungsschwingungen spielen Dämpfungseffekte als energieverzehrende Mechanismen eine wichtige Rolle. Die hierbei wirkenden Mechanismen hängen in erster Linie von der Bewegungsart und dem Amplitudenniveau ab.

Nachstehende Abb. 3-2 zeigt potentielle Dämpfungserscheinungen, die Einfluss auf das Vibrationsverhalten von Rohrleitungen nehmen.

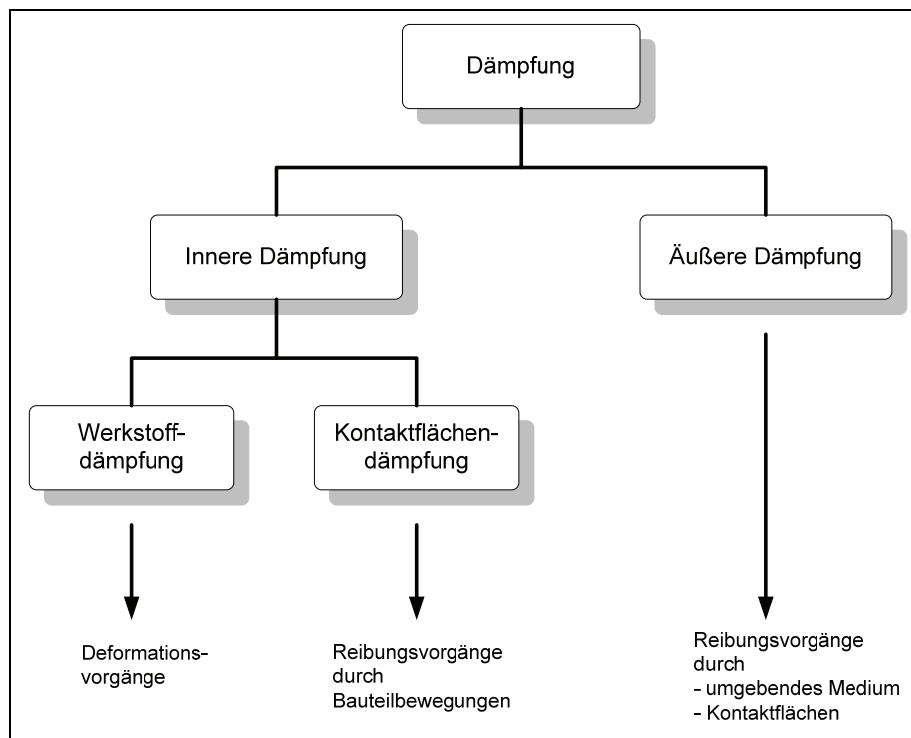


Abb. 3-2: Dämpfungseffekte bei Rohrleitungsschwingungen

Bei erdbebeteigten und zur Schwingung angeregten Rohrleitungen überwiegt der Anteil der äußeren Dämpfung, bedingt durch bewegungsabhängige Wechselwirkungen zwischen Rohrmantel und umgebendem Bodenmaterial bzw. Bohrspülung und der daraus resultierenden Kontaktflächenreibung.

Der Dämpfungsgrad lässt sich auf verschiedene Weise bestimmen, wie beispielsweise experimentell durch sog. Ausschwing- bzw. Resonanzversuche bei einfachen, bestehenden Rohrleitungssystemen oder durch eine Modalanalyse bei komplexen Systemen [27],[30].

In numerischen Berechnungsmethoden wird zur Beschreibung der realen Dämpfungseffekte häufig die sog. Rayleigh-Dämpfung verwendet, wobei von einer Dämpfungsverteilung ausgegangen wird, die von der Massenverteilung und Steifigkeit des Systems abhängt. Daraus lässt sich eine sog. Dämpfungsmatrix der Form

$$(3.12) \quad \underline{C} = \alpha \underline{M} + \beta \underline{K}$$

herleiten. Der Term  $\alpha \underline{M}$  repräsentiert die innere Dämpfung und hängt direkt von den elastischen Bewegungen des Rohres ab; der Term  $\beta \underline{K}$  beschreibt die äußere Systemdämpfung durch ein umgebendes Medium (z.B. Bodenmaterial). Die beiden unbekannten Konstanten  $\alpha$  und  $\beta$  können über das sog. Lehrsche Dämpfungsmaß  $\xi_i$  bestimmt werden, gemäß der Formel

$$(3.13) \quad \alpha + \beta \omega_i^2 = 2 \omega_i \xi_i$$

Aus nachstehender Abb. 3-3 geht diese sog. Rayleigh-Dämpfung als hyperbolische Kennlinie hervor. Demzufolge kann ein bestimmter Dämpfungswert nur innerhalb zweier Eigenfrequenzen  $f_1$  und  $f_2$  unterhalb der Linie liegen, wobei sich der Dämpfungswert nur um einen kleinen Betrag ändert. Ober- und unterhalb der Eigenfrequenzen steigt die Dämpfung an.

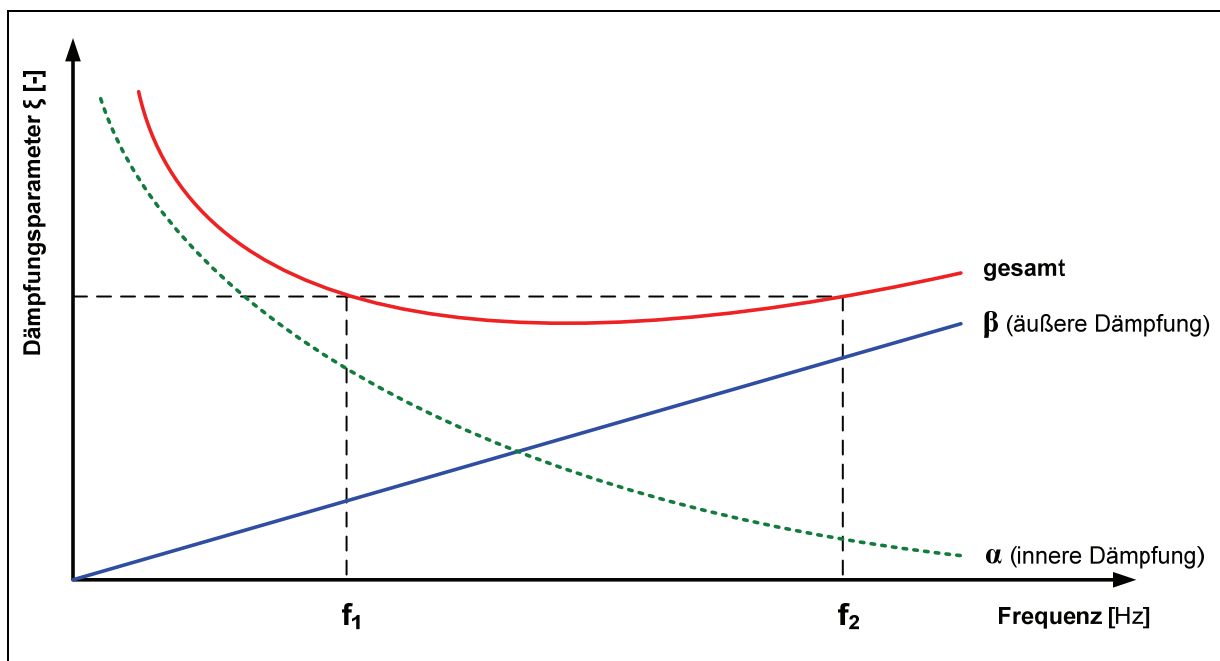


Abb. 3-3: Dämpfungsmaß  $\xi$  (Lehrsches Dämpfungsmaß) in Abhängigkeit der Eigenfrequenz

Bei der Auslegung von Rohrleitungen wird häufig als Dämpfungsmaß ein Wert von 4% angesetzt, sofern keine aus experimentellen Untersuchungen resultierenden Daten vorliegen. Nachstehende Tabelle zeigt einige Richtwerte für Dämpfungsparameter.

Tab. 3-1: Richtwerte für Dämpfungsparameter

Struktur	Dämpfungsparameter $\xi$ [%]
verschraubte Stahlteile	4 - 7
verschweißte Stahlteile	2 - 4
Rohrleitungen mit kleinem Durchmesser	1 - 2
große Rohrleitungen	2 - 3

### 3.3 Geomechanische und bodenphysikalische Grundlagen

Die Verlegung von Rohrleitungen mittels des HDD-Verfahrens erfolgt in der Regel oberflächennah und zumeist in Lockergesteinsformationen unterhalb des Grundwasserspiegels. Im Folgenden wird ein kurzer Abriss über die Eigenschaften und das Verhalten des Systems „Boden“ unter äußeren Belastungen gegeben.

#### 3.3.1 Grundlegende Eigenschaften und Basisgrößen von Böden

Lockergesteine bzw. Böden lassen sich modellhaft als Dreiphasensysteme beschreiben. Sie bestehen im Wesentlichen aus den Komponenten

- Feststoffpartikel (Bodenteilchen, Mineralkörner, etc.),
- Flüssigkeiten (zumeist Wasser) im Porenraum, d.h. zwischen den Feststoffteilchen und
- Gas bzw. Luft als weitere Porenraumfüllung.

Die Eigenschaften eines Bodens werden einerseits von der Größe, Form und Verteilung der Feststoffpartikel und andererseits vom Wassergehalt bestimmt. Grundsätzlich lassen sich Böden in nichtbindige und bindige Bodenarten klassifizieren.

Kennzeichnend für nichtbindige Böden ist, dass das physikalische und mechanische Verhalten durch Reibungskräfte zwischen den einzelnen Feststoffkörnern bestimmt wird. Bei bindigen Böden dagegen treten Oberflächenkräfte zwischen den i.d.R. feinkörnigeren Feststoffteilchen untereinander sowie zwischen den Bodenkörnern und dem vorhandenen Porenwasser auf.

Einige der wichtigsten Kenngrößen von Böden werden im Folgenden dargestellt [23],[26],[33],[44],[50],[55],[57],[63],[75].

## KORNGRÖßENVERTEILUNG

Die Festsubstanz eines Lockergesteins besteht aus Einzelkörnern unterschiedlicher Form und Größe. Zur geotechnischen Charakterisierung eines Bodens hinsichtlich seiner Eigenschaften wird im Labor die Korngrößenverteilung anhand einer repräsentativen Probe ermittelt. Der Ablauf der Analysen (Sieb- oder Sedimentationsanalysen) sowie die Einteilung der einzelnen Körnungsgruppen sind gemäß DIN 18123 genormt. Die Zusammensetzung des Bodens wird in der sog. Körnungslinie dargestellt, wobei die jeweiligen prozentualen Massenanteile den einzelnen Korngrößengruppen zugeordnet werden.

Abb. 3-4 zeigt ein Korngrößendiagramm mit einigen exemplarischen Körnungslinien.

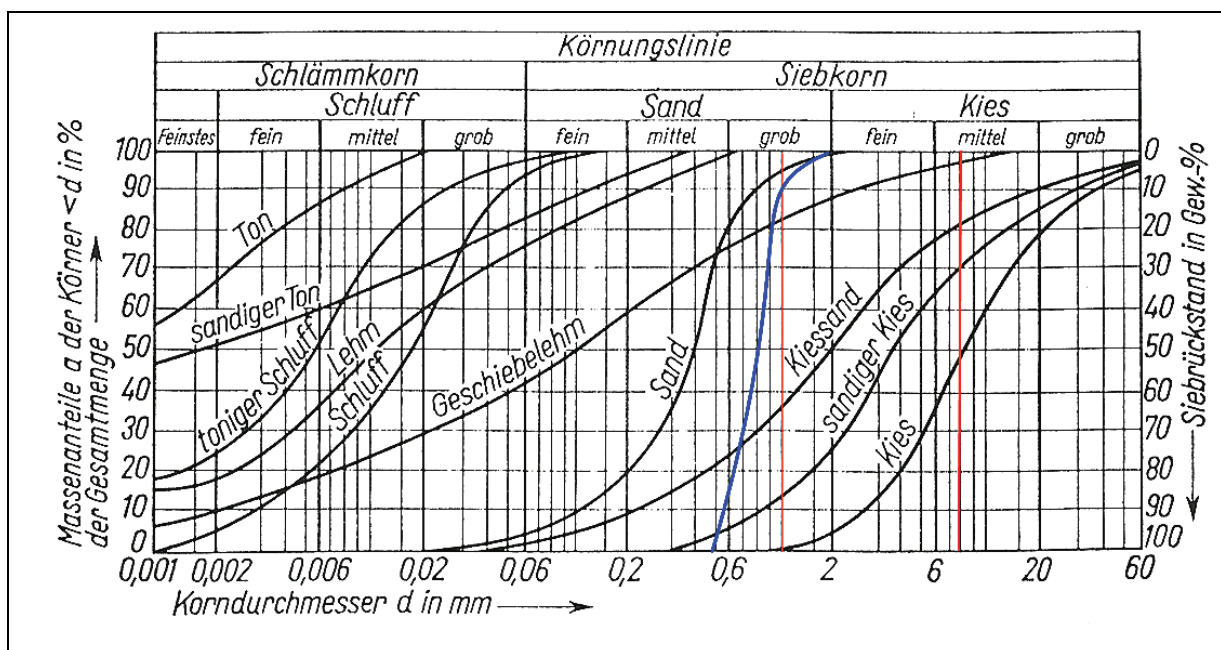


Abb. 3-4: Korngrößendiagramm mit typischen Körnungslinien

Eine wichtige Kenngröße zur Beurteilung der Bodeneigenschaften, wie beispielsweise der Verdichtbarkeit, ist der sog. Ungleichförmigkeitsgrad  $U$ . Er wird gemäß DIN 4015 definiert als das Verhältnis des Korndurchmessers  $d_{60}$  beim Siebdurchgang von 60% zu dem Durchmesser  $d_{10}$  bei 10% Siebdurchgang (3.14). Bei den Perzentilen handelt es sich um Massenanteile. Dieses Verhältnis repräsentiert die Steigung eines festgelegten Bereichs der Körnungslinie (zwischen 10% und 60% der Siebdurchgänge), d.h. je kleiner  $U$  ist, desto steiler ist die Sieblinie.

$$(3.14) \quad U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

darin sind

$d_{60}$  = maximale Korngröße bei 60% der Probenmasse [mm]

$d_{10}$  = maximale Korngröße bei 10% der Probenmasse [mm]

Der Wert der Ungleichförmigkeitszahl lässt folgende Aussagen über die Eigenschaften eines Bodens zu:

$U < 5$  gleichförmiger Boden

$5 < U < 15$  ungleichförmiger Boden

$U > 15$  sehr ungleichförmiger Boden

#### **PORENANTEIL UND LAGERUNGSDICHTE**

Als Porenraum bzw. Porenanteil wird derjenige Raum zwischen den einzelnen Bodenkörnern bezeichnet, der nicht durch diese selbst eingenommen wird. Der Porenanteil  $n$  wird durch das Verhältnis des Porenvolumens  $V_p$  zum Gesamtvolumen der Bodenprobe  $V$  bestimmt.

$$(3.15) \quad n = \frac{V_p}{V}$$

Die Porenzahl  $e$  gibt das Verhältnis des Porenanteils  $V_p$  zum Volumen der Feststoffsubstanz  $V_s$  an.

$$(3.16) \quad e = \frac{V_p}{V_s}$$

Da sich das Gesamtvolumen der Bodenprobe durch die Gleichung  $V = V_p + V_s$  beschreiben lässt, besteht zwischen der Porenzahl  $e$  und dem Porenraum  $n$  folgender Zusammenhang:

$$(3.17) \quad e = \frac{n}{n-1} \quad \text{bzw.} \quad n = \frac{e}{1+e}$$

Unter Zugrundelegung der labortechnisch im Trockenschrank ermittelten Trockenwichte  $\gamma_d$  und Kornwichte  $\gamma_s$  (z.B. Sand  $\gamma_s = 26,0 \text{ kN/m}^3$ ) können o.g. Gleichungen wie folgt formuliert werden:

$$(3.18) \quad e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1 \quad \text{bzw.} \quad n = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s}$$

Innerhalb des Gesamtsystems eines Bodens können die Einzelkörner verschiedene Anordnungen zueinander einnehmen. Die unterschiedlichen Lagerungsverhältnisse beeinflussen das vorhandene Porenraumvolumen bzw. den Porenanteil und bestimmen damit die mechanischen Eigenschaften eines Bodens. Grundsätzlich können unterschieden werden:

- die natürliche Lagerung,
- die dichteste Lagerung sowie
- die lockerste Lagerung.

Die Lagerungsdichte  $D$  kann durch Verdichtung des Bodens erhöht werden. Sie lässt sich über die jeweiligen Porenanteile bei unterschiedlichen Lagerungsverhältnissen über folgende Beziehung bestimmen:

$$(3.19) \quad D = \frac{(\max n) - n}{\max n - \min n}$$

mit

$\max n$  = Porenanteil bei lockerster Lagerung

$\min n$  = Porenanteil bei dichtester Lagerung

$n$  = natürlicher bzw. nach Verdichtung vorhandener Porenanteil

bzw. als bezogene Lagerungsdichte  $I_D$  über die Porenzahlen

$$(3.20) \quad I_D = \frac{\max e - e}{\max e - \min e}$$

mit

$\max e$  = Porenzahl bei lockerster Lagerung

$\min e$  = Porenzahl bei dichtester Lagerung

$e$  = Porenzahl bei natürlicher Lagerung

Die Bezeichnung der Lagerungsdichte für Lockergesteine ergibt sich aus Tab. 3-2.



Tab. 3-2: Bezeichnung der Lagerungsdichten

Bezeichnung	D	I <sub>D</sub>
sehr locker	0 - 0,15	-
locker	0,15 - 0,3	0 - 0,33
mitteldicht	0,3 - 0,5	0,33 - 0,66
dicht	0,5 - 0,7	0,66 - 1,0
sehr dicht	0,7 - 1,0	-

### DURCHLÄSSIGKEIT

Die Durchlässigkeit  $k$  eines Bodens, beschrieben durch das Gesetz von DARCY (Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$ ), wird stark vom Porenanteil sowie der Korngröße bzw. Korngrößenverteilung beeinflusst. Den Anteil des Wasservolumens am Porenvolumen der Bodenprobe beschreibt die sog. Sättigungszahl  $S_r$ :

$$(3.21) \quad S_r = \frac{V_F}{V_n} [-]$$

mit

$V_F$  = Porenvolumen [m<sup>3</sup>]

$V_n$  = Volumen der fluiden Phase [m<sup>3</sup>]

Nachstehende Abb. 3-5 zeigt anhand eines sog. Kugelmodells zwei Böden mit unterschiedlicher Korngröße und Durchlässigkeit. Die Porenzahl beider Böden ist gleich, sie besitzen jedoch unterschiedliche Drainageeigenschaften. Boden A ist dabei viel durchlässiger als Boden B.

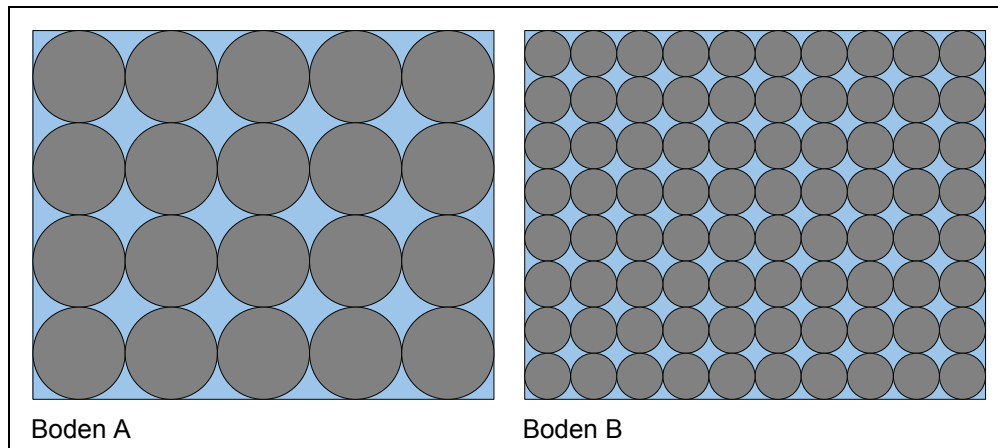


Abb. 3-5: Durchlässigkeit von Böden in Abhängigkeit der Korngröße, Kugelmodell

Für Lockergesteine werden in der Literatur Durchlässigkeitsbeiwerte zwischen  $10^{-1}$  m/s für Kies und  $10^{-11}$  m/s für Ton angegeben.

Dem Porenanteil, dem Kornspektrum sowie der Wassersättigung kommt im Hinblick auf das Verflüssigungspotenzial eines Bodens eine wichtige Bedeutung zu (s. Kap. 3.3.3). Ist dieser Effekt in der Bodenphysik zumeist mit negativen Auswirkungen verbunden (z.B. Setzungsfließen an ehemaligen Tagebaukippen, Liquefaktionserscheinungen infolge von Erdbeben etc.), so wird er im Falle des vorliegenden Forschungsprojektes gezielt herbeigeführt, um durch die Bildung einer verflüssigten Zone um das einzuziehende Rohr die gewünschte Zugkraftreduzierung zu erreichen.

### 3.3.2 Verhalten von Böden unter statischer Belastung

Bei Erdbauarbeiten, insbesondere bei der Realisierung von HDD-Projekten sowie zum Nachweis der Standsicherheit von Bauwerken und Verbundkonstruktionen im Lockergestein, ist die Kenntnis der Baugrundfestigkeit eine elementare Voraussetzung für die erfolgreiche Durchführung der Baumaßnahme. Die Festigkeit eines Bodens wird nicht allein durch die Stabilität der einzelnen Bodenteilchen bzw. des Kornverbundes bestimmt, sondern u.a. durch das Zusammenwirken mit dem Porenwasser.

#### SPANNUNGSZUSTÄNDE IM BODEN

Wird ein Lockergestein mit einer äußeren Last beaufschlagt, bilden sich innerhalb des Gefüges Spannungen aus. Eine infinitesimale Betrachtung eines dreidimensionalen Spannungszustandes an einem quaderförmigen Volumenelement liefert folgende Zustandsbeschreibung:

Der an einem beliebigen Punkt einer Schnittebene eines Elementarquaders freigelegte Spannungsvektor  $\sigma$  kann in eine Normalspannungskomponente  $\sigma_n$  und eine Schubspannungskomponente  $\tau$  aufgeteilt werden. Durch Freischneiden des Körpers ergeben sich an jeder der zueinander senkrechten Flanken Spannungszustände wie in nachstehender Abb. 3-6 dargestellt.

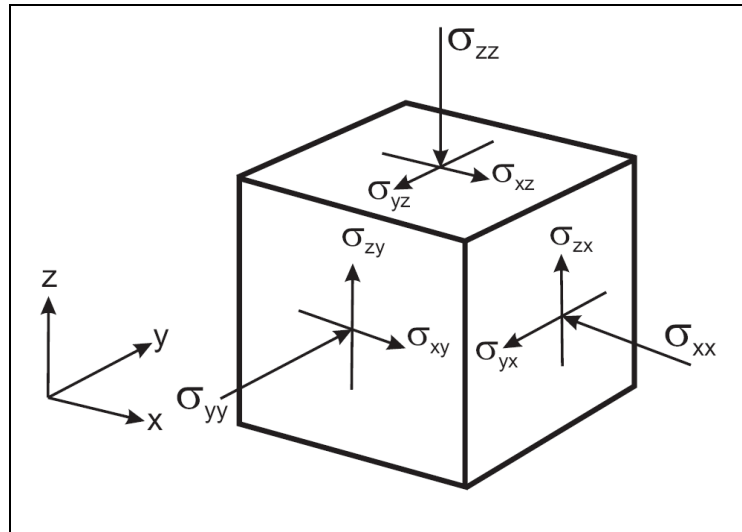


Abb. 3-6: Spannungskomponenten eines Elementarquaders

Die Spannungskomponenten der drei zueinander orthogonalen Schnittebenen werden in Matrizenschreibweise wie folgt dargestellt und bilden den sog. Spannungstensor  $S$ :

$$(3.22) \quad S = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix}$$

Die Diagonalelemente  $\sigma$  stellen dabei die Normalspannungen dar, also die Kräfte, die senkrecht zur Fläche wirken, die nichtdiagonalen Elemente  $\tau$  repräsentieren die tangential zur Fläche wirkenden Schubspannungen.

### PORENWASSERDRUCK

Bei wassergesättigten Lockergesteinen wird die äußere Beanspruchung neben dem Korngerüst teilweise auch durch das Porenwasser aufgenommen. Eine Steigerung des Druckes bzw. der Spannung führt zu einer Erhöhung des Porenwasserdruckes  $u$  gemäß der Beziehung

$$(3.23) \quad \sigma = \frac{F}{A} = u$$

Die Spannungskomponente, die ausschließlich durch das Korngerüst übertragen bzw. aufgenommen wird, wird als effektive Spannung  $\sigma'$  bezeichnet. Das ‚Prinzip der effektiven Spannungen‘ wurde von TERZAGHI formuliert, die totale Spannung  $\sigma$  setzt sich demnach aus der effektiven Spannung  $\sigma'$  und dem Porenwasserdruck  $u$  zusammen.

$$(3.24) \quad \sigma = \sigma' + u \text{ [Pa]}$$

Der Porenwasserdruck nimmt für die hier im Rahmen der Forschungsarbeit behandelten Problemstellung eine zentrale Stellung ein. Die in das Rohr eingebrachten hochfrequenten Schwingungen führen in einer schmalen Erdzone um die Rohroberfläche zu einem Anstieg des Porenwasserdrucks. Hierdurch kommt es zu partiellen Gefügeumlagerungen bis zur Teilverflüssigung des umgebenden Materials (pseudoplastische Verflüssigungszone im kohäsiven Baugrund). Dies bewirkt eine Herabsetzung der Scherfestigkeit des Bodenmaterials (Kontaktzone Rohr-Boden) und führt damit zu einer Reduzierung der Reibkräfte und folglich der für den Rohreinzug erforderlichen Zugkraft.

### VERFORMUNG

Die Verformungseigenschaften eines Lockergesteins werden überwiegend durch eine bleibende (plastische) Deformation gekennzeichnet. Da die Festbestandteile eines Bodens, d.h. die Einzelkörner, wenig kompressibel sind, findet unter der Aufgabe einer äußeren Beanspruchung, neben einer Umlagerung von Gefügeteilchen, größtenteils eine Verringerung des Porenraumes statt. Daraus resultiert eine Konsolidierung des Materials. Bei wassergesättigten Böden geht dieser Vorgang, bei günstigen Drainagebedingungen, mit einer Abnahme des Wassergehaltes einher.

Die plastischen Verformungseigenschaften eines Lockergesteins können in Laborversuchen ermittelt werden. Sie sind u.a. abhängig von

- den Materialeigenschaften,
- dem Zustand des Bodens (Lagerungsdichte, Durchlässigkeit, Wassergehalt),
- der Art und Intensität der Spannungsänderung sowie
- der Dauer der Beanspruchung.

Der Verlauf der Bodenkonsolidation ist zeitabhängig. Die bezogene Setzung  $s$  kann, insbesondere bei bindigen Böden, als Funktion der Zeit in einem sog. Zeit-Setzungs-Diagramm dargestellt werden (Abb. 3-7).

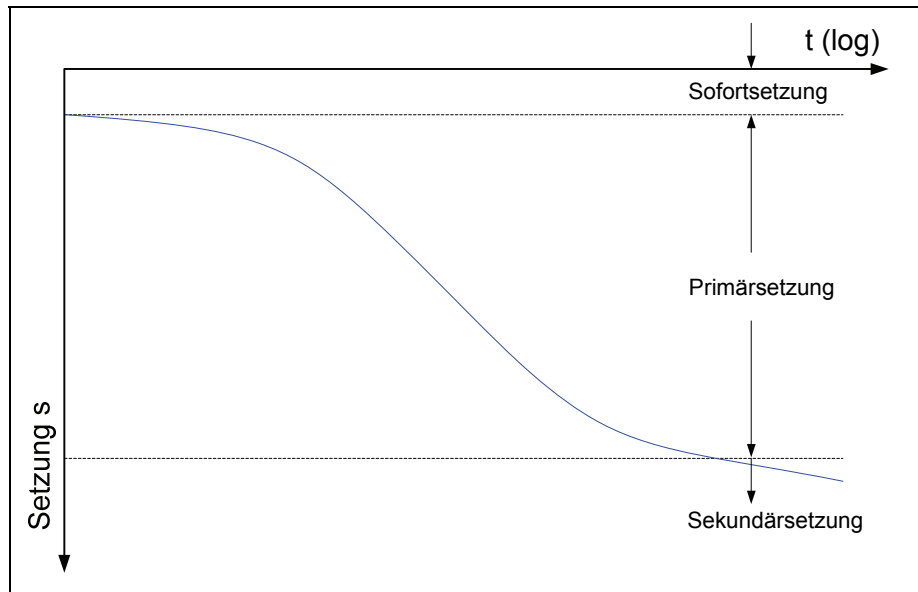


Abb. 3-7: Zeitsetzungsverhalten von Lockergesteinen

Die Sofortsetzung tritt unmittelbar nach Aufbringen der Last für kurze Zeit auf und wird durch Scherverformungen verursacht. Die Primärsetzung (auch Konsolidationssetzung) stellt den Hauptanteil der Setzungserscheinung dar und steht in Zusammenhang mit dem Auspressen von Porenwasser. Hervorgerufen durch ein Kriechen des Materials hält die Sekundärsetzung bei konstanter Belastung auch noch über die Konsolidierungszeit hinaus an.

Das Spannungs-Verformungsverhalten von Lockergesteinen zeigt einen nichtlinearen Verlauf und hängt u.a. ab von der Belastungsgeschichte des Bodens. So können vorbelastete Böden den Spannungszustand nach Abklingen der äußeren Belastung durch die Beibehaltung des verringerten Porenraumes ‚speichern‘. Dieser Zustand wird als Überkonsolidierung bezeichnet. Ein weiteres Merkmal ist, dass eine dynamische Belastung bei ausreichend hoher Belastungsrate zu keiner Konsolidation des Bodens führt, wie im Falle hochfrequenter Schwingungen.

## SCHERFESTIGKEIT

Die Scherfestigkeit beschreibt den Widerstand, den ein Körper bzw. eine Bodenprobe einer tangentialen Scherbeanspruchung entgegensetzt und ist linear abhängig von der auf die Scherfläche wirkenden Normalspannung. Sie gibt die maximale Schubspannung an, mit der die Probe belastet werden kann, ohne sich plastisch zu verformen. Die Bestimmung der Scherfestigkeit erfolgt gemäß der in der DIN 18137 festgelegten Laborversuche. Hierbei wird die Probe beispielsweise in einem sog. Kastenschervergerät einer Normalspannung  $\sigma$  ausgesetzt und anschließend unter Einleitung einer Tangentialspannung  $\tau$  abgeschert. Der zeitliche

Verlauf einer Scherbeanspruchung einer Bodenprobe wird in einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm ( $\tau$ - $\gamma$  Diagramm) dargestellt (Abb. 3-8).

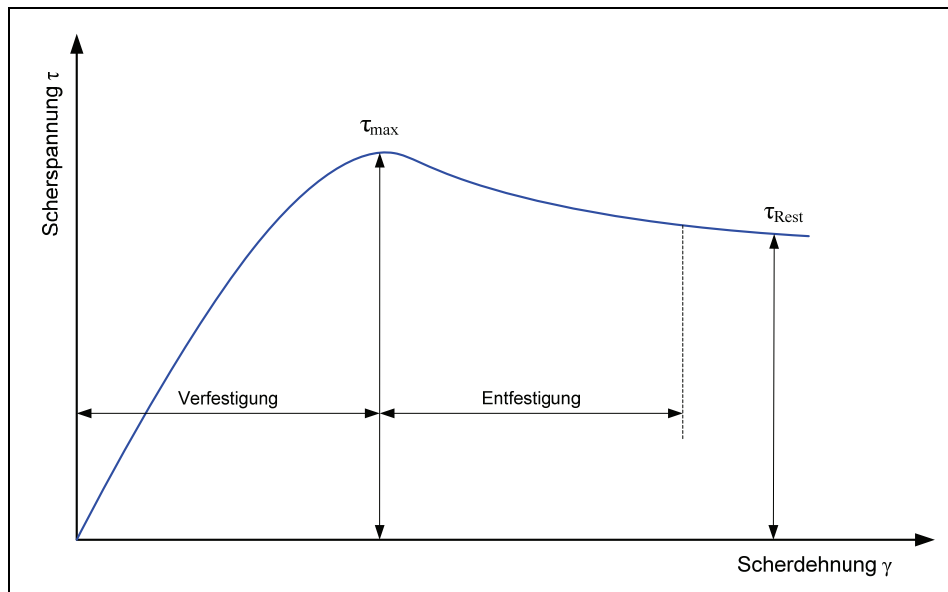


Abb. 3-8:  $\tau$ - $\gamma$  Diagramm der Scherbeanspruchung

Nach dem Belastungsbeginn verhält sich der Boden zunächst linear elastisch, bis Fließen einsetzt. Bei weiterer Scherbeanspruchung verfestigt sich die Probe, bis die maximale Scherfestigkeit  $\tau_{\max}$  erreicht ist. Danach ist eine fortschreitende Entfestigung durch Auflockerung zu beobachten, bis sich die Kennlinie (nach großen Verformungsbeträgen) asymptotisch einem Minimalwert, der Restscherfestigkeit  $\tau_{\text{Rest}}$  annähert.

Der Betrag der Scherfestigkeit hängt von folgenden Bodenparametern ab:

- Korngröße bzw. Korngrößenverteilung
- Kornform
- Lagerungsdichte
- Wassergehalt
- Konsistenz
- Dauer der Beanspruchung
- Beanspruchungsgeschwindigkeit

Durch die Auswertung mehrerer Einzelscherversuche lässt sich die sog. Mohr-Coulomb'sche-Grenzbedingung (Bruchbedingung) formulieren, die in der Geomechanik eine zentrale Funktion gemäß der linearen Formel

$$(3.25) \quad \tau_f = \sigma' \cdot \tan \varphi + c$$

mit

$\tau_f$  = Scherfestigkeit

$\sigma'$  = effektive Spannung

$\tan \varphi$  = Winkel der inneren Reibung

$c$  = Kohäsion

einnimmt.

Diese Beziehung lässt sich grafisch als sog. Schergerade darstellen, die als gemeinsame Tangente der jeweiligen Spannungskreise die maximal ertragbaren Schubspannungen in einem Bodenelement beschreibt (Abb. 3-9). Der kritische Spannungszustand wird allgemein durch die Funktion  $\tau_f = f(\sigma_f)$  beschrieben.  $\tau_f$  bezeichnet die resultierende Schubspannung in der Scherfläche im Bruchzustand,  $\sigma_f$  die entsprechende Normalspannung.

Der Grenzspannungszustand kann auch durch die zugehörigen Hauptspannungen beschrieben werden. Nach Mohr ist der Zusammenhang zwischen der größten und kleinsten Hauptspannung ( $\sigma_1$  und  $\sigma_3$ ) in einem Grenzzustand näherungsweise unabhängig von der zugehörigen mittleren Hauptspannung  $\sigma_2$ . Das Verhältnis der Hauptspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_3$  im Bruchzustand wird durch den Mohr'schen Spannungskreis wiedergegeben.

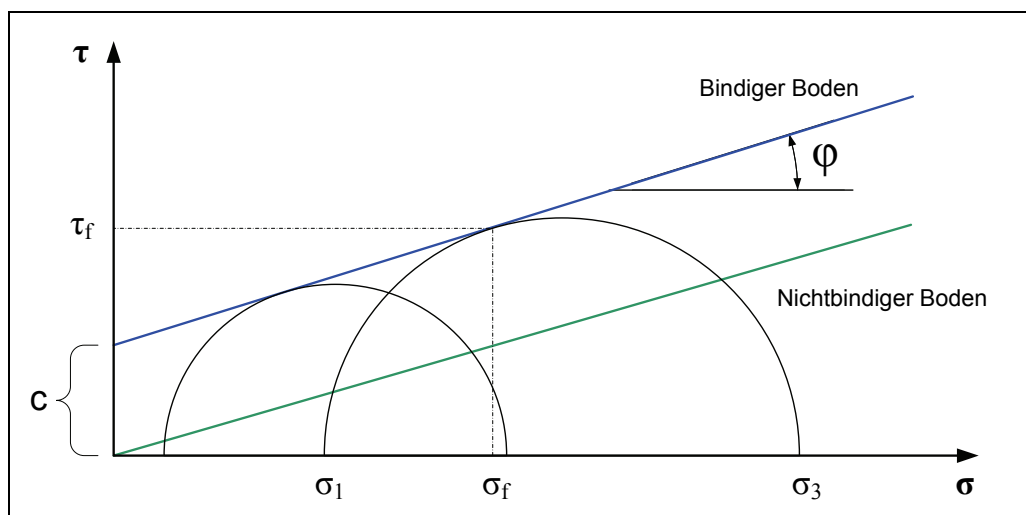


Abb. 3-9: Mohr-Coulomb'sche Grenzbedingung für einen bindigen und nichtbindigen Boden

Bei nichtbindigen Lockergesteinen verläuft die Mohr-Coulomb'sche Gerade durch den Ursprung des Achsensystems. Die Steigung der Schergeraden entspricht dem Winkel der inneren Reibung  $\varphi$ . Bei bindigen Böden schneidet die Gerade die Ordinate bei der Schubspannung  $c$ , die als Kenngröße die Kohäsion repräsentiert. Diese Schubspannung kann



auch ohne Wirkung einer Normalspannung ertragen werden, gerade ohne dass der Boden versagt.

Die Größe der Scherfestigkeit hängt gemäß der Gleichungen (3.24) und (3.25) von der Wassersättigung des Bodens ab. Da die Totalspannung teilweise durch das Porenwasser aufgenommen werden kann, wird bei der Ermittlung der Scherfestigkeiten von Lockergesteinen unterschieden zwischen drainierten und undrainierten sowie konsolidierten und unkonsolidierten Böden.

### **3.3.3 Verhalten von Böden unter dynamischer Belastung**

Wie im vorangehenden Kapitel 3.3.2 dargestellt, setzt sich die auf einen Boden einwirkende Totalspannung aus der auf das Korngerüst wirkenden effektiven Spannung und dem Porenwasserdruck zusammen (Prinzip der effektiven Spannungen). Die Höhe des Porenwasserdrucks hängt vom Grad der Wassersättigung und den Drainagebedingungen des Bodens ab. Kann das zusätzliche Wasser infolge einer statischen Beanspruchung entweichen, geht die resultierende Spannung auf das Korngerüst über.

Neben dieser statischen Belastung kann ein Lockergestein auch eine zyklische Beanspruchung erfahren, beispielsweise durch seismische Einwirkungen infolge von Erdbeben, Sprengungen, Schwingungen an Maschinenfundamenten oder den Einsatz vibrationstechnischer Methoden im Erdbau bzw. - wie im vorliegenden Forschungsprojekt - durch die gezielte Einleitung von Vibrationen beim HDD.

Neben möglichen substanziellen Beeinträchtigungen angrenzender Objekte können durch den Schwingungseintrag, auch in größerer Entfernung zur Erregerquelle, Verdichtungseffekte und/oder Sackungen auftreten. Diese Gefahr besteht insbesondere bei lang anhaltenden und häufig wiederkehrenden Erschütterungseinwirkungen an Objekten, die auf locker gelagerten, gleichförmigen Sanden und Schluffen gegründet sind. Darüber hinaus kann es unter bestimmten Voraussetzungen zu einer Bodenverflüssigung (Liquefaktion) kommen. Besonders Resonanzeffekte begünstigen die o.g. Erscheinungen, sie sind für die vorliegende Problemstellung beim HDD als kontraproduktiv anzusehen.

### **EIGENSCHWINGUNGSVERHALTEN VON BÖDEN**

Jedes schwingfähige System kann zu Eigenschwingungen angeregt werden, so auch Böden. Anders als in der Festigkeitslehre kann der Bereich der Resonanzfrequenz in der Geotechnik nicht eindeutig festgeschrieben werden, da sich im Allgemeinen die Eigenfrequenz des Vibrator-Boden-Systems in Abhängigkeit der Bodendichte und demzufolge der Bodensteifigkeit fortlaufend ändert. Folglich muss hier beachtet werden, dass es sich im

vorliegenden Fall um Resonanzerscheinungen in einem Bereich handelt, in dem die Erregerfrequenz annähernd der Eigenfrequenz des Gesamtsystems (Vibrator - Boden) entspricht. Erst wenn durch die initiierten Schwingungen keine weitere Gefügeumlagerung bzw. Verdichtung erreicht wird, stellt sich ein stationärer Gleichgewichtszustand ein. Zur Aufrechterhaltung des Resonanzzustandes des Bodens müsste demzufolge die Erregerfrequenz permanent an die sich ändernde Resonanzfrequenz des Bodens angepasst werden, was für die hier vorliegende Problemstellung jedoch als kontraproduktiv anzusehen ist, da eine Verdichtung des umgebenden Bodenmaterials vermieden werden soll.

Einen weiteren Einfluss auf das Eigenschwingverhalten nimmt die Systemdämpfung, wobei für den Resonanzfall eine Amplitudenvergrößerung und damit ein erhöhter Bewegungsenergieeintrag in das System einhergehen. Mit zunehmendem Spannungszustand (Bodenüberdeckung), d.h. zunehmender Dichte und Steifigkeit des Baugrundes, resultieren eine Verringerung der Dämpfungseigenschaften des Bodens und damit eine Erhöhung der Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten.

In der nachstehenden Abb. 3-10 sind die Einflussgrößen bei der Betrachtung eines Rüttler-Boden-Systems aufgeführt.

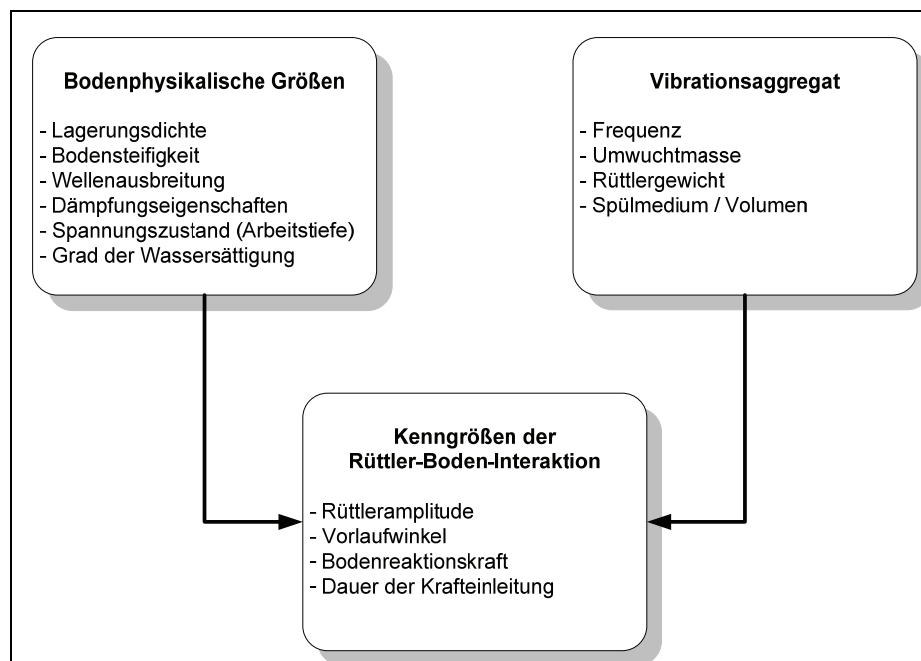


Abb. 3-10: Einflussgrößen auf das Schwingungsverhalten des Rüttler-Boden-Systems

Die oben beschriebenen Eigenschaften und die sich daraus ergebenden Effekte nehmen Einfluss auf spezielle Verfahren des Erd- und Ingenieurbaus (s. Kapitel 4). So kann beispielsweise der Resonanzbereich von Lockergesteinen gezielt genutzt werden, um den Verdichtungserfolg oder das Einbringen von Spundwänden oder Rammpfählen mit Hilfe von

Schwingungen, die im Bereich der Resonanzfrequenz des Bodens liegen, zu verbessern. Sollen hingegen Verdichtungseffekte, Bodensetzungen oder Bauwerksschäden in der Umgebung der Schwingungsquelle vermieden werden, sollte die Frequenz der Schwingungen oberhalb der Eigenfrequenz des Bodens liegen.

In nachstehender Tab. 3-3 findet sich eine Zusammenstellung von typischen Eigenfrequenzen verschiedener Lockergesteine.

Tab. 3-3: Charakteristische Eigenfrequenzen ausgewählter Lockergesteine

Bodenart	Eigenfrequenz [Hz]
Feiner Sand	~ 24
Sand, ungleichförmig, trocken	~ 27
Sand, wassergesättigt	~ 55 - 70
Mittlerer Sand, ungleichförmig	~ 24
Mittlerer Sand, gleichförmig	~ 33
Grober Sand, feucht	~ 24
Grober Sand, trocken	~ 22
Sand / Kies	~ 24 - 29
Lehm, fest	~ 25 - 29
Lehm, locker	~ 21 - 23
Ton, feucht	~ 22
Ton, trocken	~ 28
Kalkstein, gebankt	~ 30
Buntsandstein	~ 34

Zur detaillierten Beschreibung des Resonanzverhaltens von Böden sei auf entsprechende Literatur verwiesen. Vor allem im Zusammenhang mit der Untersuchung von Bodenverbesserungssystemen und -mechanismen wurden in diesem Bereich zahlreiche Untersuchungen durchgeführt.

### **BODENVERDICHTUNG**

Kennzeichnend bei einer zyklischen Beanspruchung von Lockergesteinen ist eine Umorientierung der Einzelkörner, verbunden mit hydraulischen Effekten (Porenwasserüberdruck) innerhalb des Bodengefüges. Aufgrund der eingeleiteten Schwingungsenergie erfolgt eine Verringerung der Reibungskräfte bis hin zum vollständigen Verlust des Kontaktes der Einzelkörner. Geht die genannte Gefügeumlagerung mit einer Reduzierung des Porenraumes einher, erhöht sich infolge dessen die Lagerungsdichte des Bodens (Kompaktion) bei ausreichenden Drainagebedingungen. Diese Eigenschaften werden beispielsweise bei der dynamischen Bodenverdichtung ausgenutzt.

Auf die geophysikalischen Zusammenhänge der Bodenverdichtung sowie der technischen Applikationen sei auf Kapitel 4.4 verwiesen.

### **BODENVERFLÜSSIGUNG**

Wird ein Lockergestein einer schlagartigen oder dauerhaften dynamischen / zyklischen Beanspruchung ausgesetzt, kann sich, insbesondere bei behinderten Drainagebedingungen, ein Porenwasserüberdruck ausbilden, der zu einer Verringerung der effektiven Spannungen und damit zu einer Abnahme der Scherfestigkeit führt. Infolge dessen kann es zu einer Verflüssigung (Liquefaktion) des Bodens kommen. Das dann vorhandene Boden-Wasser-Gemisch kann keine Scherbeanspruchung mehr aufnehmen, da keine Reibungskräfte zwischen den einzelnen Bodenkörnern wirken. Das Gemisch verhält sich wie eine viskose Flüssigkeit.

Die Ausbildung des Porenwasserüberdrucks ist abhängig von der Zyklenzahl  $N$  der Schwingungserregung (Frequenz). Für jede Bodenart existiert eine bestimmte empirisch ermittelte Zyklenzahl  $N_1$ , bei der ein vollständiger Verlust der effektiven Spannung im Korngerüst eintritt. Das Maß des unter Vibrationseinleitung entstehenden Porenwasserüberdrucks kann unter Verwendung dieser Größen durch folgende Gleichung beschrieben werden.

$$(3.26) \quad \frac{u}{\sigma'} = \frac{2}{\pi} \arcsin \left[ \left( \frac{N}{N_1} \right)^{\frac{1}{2\alpha}} \right]$$

mit

$u$  = Porenwasserdruck

$\sigma'$  = effektive Spannung

$N$  = auf eine Bodenprobe aufgebrauchte Zyklenzahl

$N_1$  = Zyklenzahl, bei der ein Verlust der effektiven Spannung eintritt

Das Phänomen der Bodenverflüssigung kann beispielsweise bei Erdbeben in lockeren, wassergesättigten Sandformationen auftreten. Derartige Erscheinungen haben in der Vergangenheit bereits zu großen Schäden geführt. Ursächlich auf den gleichen Mechanismus zurückzuführen ist das sog. Setzungsfließen bei ehemaligen Tagebaukippen, die dem Grundwasser exponiert sind. Hier können bereits kleine Impulsinitiale zu einem spontanen Abgang von Böschungen führen, die sich in kürzester Zeit stark abflachen.

Das Potenzial der Verflüssigung eines kohäsionsarmen bzw. kohäsionslosen Lockergesteins kann mittels der Mohr-Coulomb'schen Grenzbedingung beschrieben werden. Hierfür wird in diese Grenzbeziehung gemäß Gleichung (3.25) das Prinzip der totalen Spannung einbezogen:

$$(3.27) \quad \tau_f = \sigma' \cdot \tan \varphi = (\sigma - u) \tan \varphi$$

Erreicht der Porenwasserdruck  $u$  einen Wert, der gleich der totalen Spannung  $\sigma$  ist, geht die innere Reibung des Bodens gegen Null und die Scherfestigkeit verloren.

Das Verflüssigungsverhalten kohäsionsloser Lockergesteine wird im Wesentlichen von folgenden Faktoren bestimmt:

- Korngrößenverteilung,
- Lagerungsdichte,
- Verhältnis von Schubspannung und Vertikalspannung,
- Konsolidierungszustand sowie
- Kornbeschaffenheit, Bodenstruktur und Bodenalter.

Bodenverflüssigungen treten nur dann auf, wenn eine entsprechende Konstellation aus den o.g. Randbedingungen vorliegt. Zur Ermittlung des Liquefaktionspotenzials sowie zur Bestimmung der relevanten Einflussparameter werden Insitu- und Laborversuche durchgeführt.

Von großer Bedeutung sind Feldversuche, da von ungestörten Bodenproben ausgegangen werden kann (z.B. Standard Penetration Test, Cone Penetration Test, Pressiometerversuche). Aus den resultierenden Messergebnissen, wie beispielsweise der Schlagzahl, dem Spitzenwiderstand, der Mantelreibung oder dem Dilatanzwinkel, kann das Verflüssigungspotenzial berechnet werden.

Anhand von Laborversuchen können ebenfalls relevante Einflussgrößen bestimmt werden. Hierbei werden beispielsweise zyklische Triaxialzellen, Rahmenschergeräte, Torsionsmessgeräte oder Rütteltische eingesetzt. Mit Hilfe dieser Apparaturen kann die

Bodenverflüssigung herbeiführende kritische Schubspannung in Abhängigkeit der Belastungszyklenzahl bzw. der Wellengeschwindigkeit ermittelt werden.

Im Jahre 1990 wurde durch den Kerntechnischen Ausschuss (KTA) die sog. ‚Sicherheitstechnische Regel zur Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen‘ (KTA 2201.2) formuliert. Die darin festgelegte Abschätzung der Verflüssigungsgefahr orientiert sich an den geomechanischen Eigenschaften und den Spannungsverhältnissen des Baugrundes. Der Einteilung gemäß können demnach verflüssigungsgefährdete und nicht verflüssigungsgefährdete Böden unterschieden werden.

Ein erster Schritt zur Abschätzung des Liquefaktionspotenzials ist die Ermittlung der Korngrößenverteilung. In Abhängigkeit der Korngröße wurden zwei Zonen festgelegt, in denen eine hohe Verflüssigungsneigung besteht (Abb. 3-11).

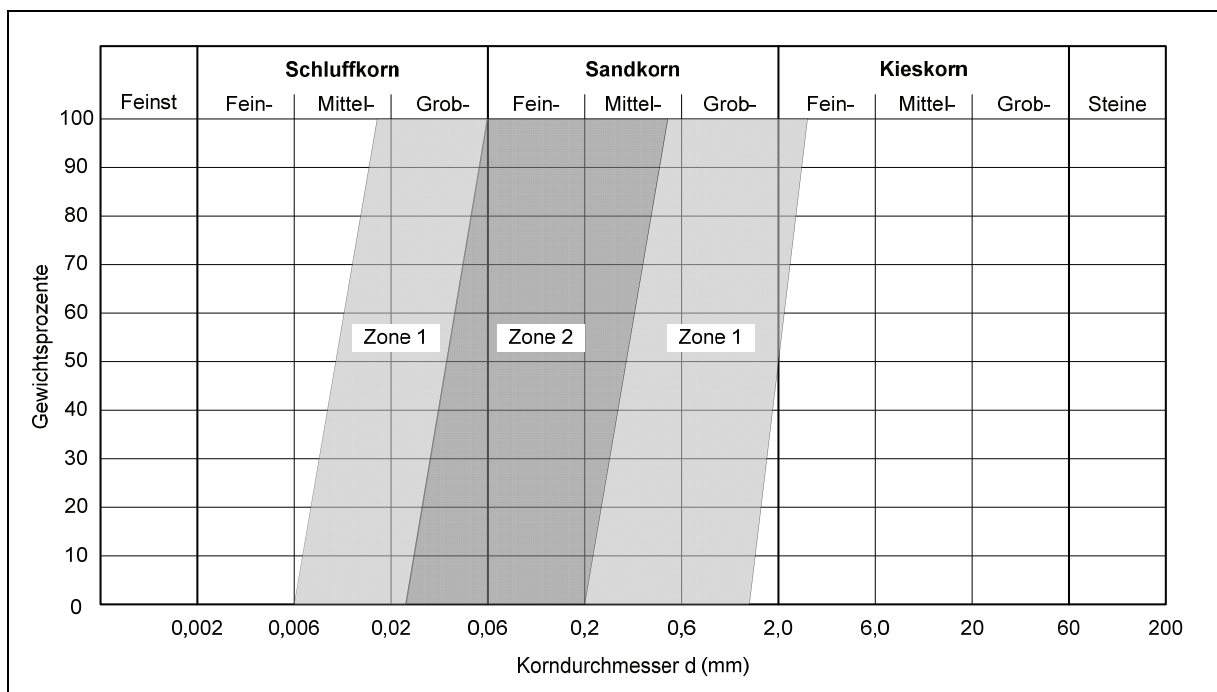


Abb. 3-11: Verflüssigungsgefährdete Kornverteilungsbereiche [42]

Liegt die gemäß der Sieb- bzw. Schlämmanalyse ermittelte Korngrößenverteilung der Bodenprobe außerhalb der festgelegten Zonen 1 und 2, ist im Falle einer zyklischen Beanspruchung keine Liquefaktion zu erwarten. Andernfalls sind laut KTA 2201.2 erweiterte Untersuchungen erforderlich.

Eine weitere wichtige Einflussgröße auf die Verflüssigung ist die Lagerungsdichte des Lockergesteins. Je lockerer ein Sandboden gelagert ist, desto höher ist das Verflüssigungspotenzial. Bei sonst gleichbleibenden Randbedingungen nimmt die Neigung zur Liquefaktion mit Zunahme der wirksamen Spannungen im Boden ab.

Zur Abschätzung des Einflusses der Lagerungsdichte wurde ein Diagramm entwickelt, in dem die bezogene Lagerungsdichte des Bodens  $I_D$  dem sog. dynamischen Schubspannungsverhältnis  $\tau/\sigma'_0$  zugeordnet wird (Abb. 3-12). In Abhängigkeit der ermittelten Korngrößenverteilung eines Bodens in den verflüssigungsgefährdeten Bereichen (Zone 1 oder Zone 2 gemäß Abb. 3-11) ist entsprechend die Kurve  $Z_1$  bzw.  $Z_2$  als Grenzlinie für die Verflüssigungsgefahr zu betrachten.

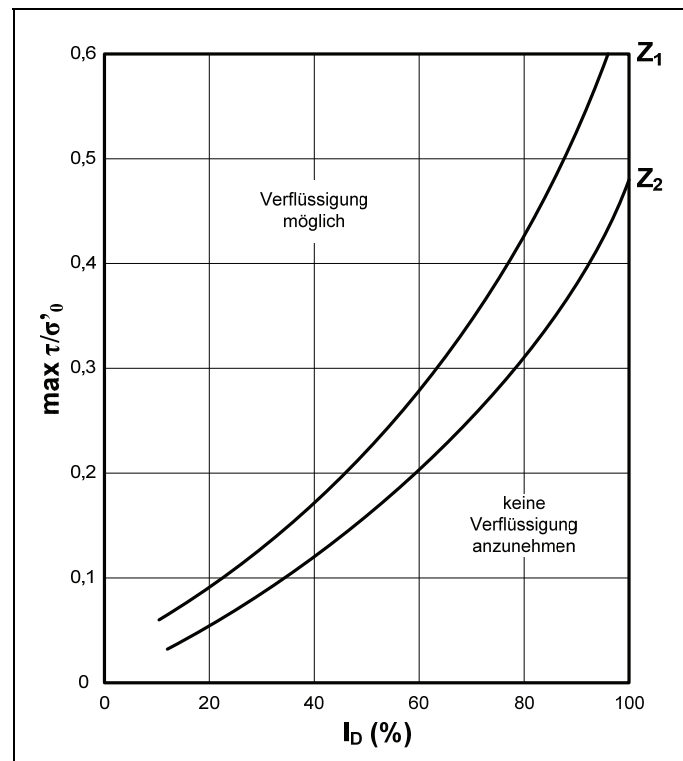


Abb. 3-12: Abschätzung der Verflüssigungsneigung in Abhängigkeit der Lagerungsdichte

Liegt der Schnittpunkt aus dem Schubspannungsverhältnis und der relativen Lagerungsdichte unter der maßgeblichen Grenzkurve, ist eine Bodenverflüssigung unwahrscheinlich.

Das dynamische Schubspannungsverhältnis berechnet sich aus dem Verhältnis der maximalen Schubspannung  $\max \tau$  zur wirksamen vertikalen Spannung  $\sigma'_0$  in der Teufe  $t$  gemäß:

$$(3.28) \quad \max \tau = \sigma_0 \frac{\max a}{g} r_d$$

mit

$\max \tau$  = maximal auftretende Schubspannung

$\sigma_0$  = totale Vertikalspannung in der Teufe  $t$



$\max a$  = Maximalwert der Resultierenden der Horizontalbeschleunigung einer dyn. Erregung  
 $g$  = Erdbeschleunigung  
 $r_d$  = Reduktionsfaktor in Abhängigkeit der Tiefe

Der tiefenabhängige Reduktionsfaktor  $r_d$  kann nachstehendem Diagramm entnommen werden.

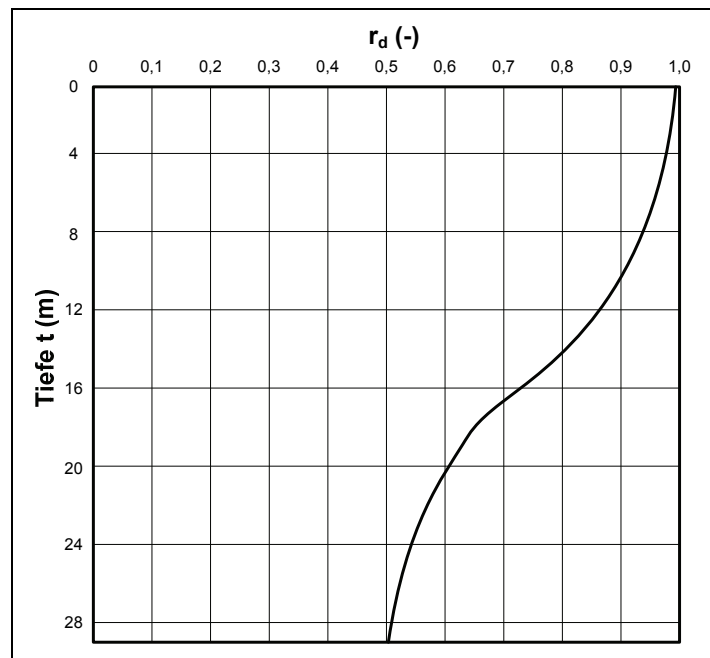


Abb. 3-13: Reduktionsfaktor  $r_d$  in Abhängigkeit der Tiefe

Lockergesteine, deren Kornspektrum im Bereich zwischen Mittelschluff und Grobsand liegt, können allgemein als verflüssigungsgefährdet eingestuft werden. Grundsätzlich neigen gleichförmige und feine Sandböden mehr zur Verflüssigung als ungleichförmige und grobe Sande. Besonders bei hoch liegendem Grundwasserstand ist die Gefahr der Liquefaktion gegeben. Diesbezüglich spielt die Durchlässigkeit des Untergrundes im Hinblick auf die Drainagebedingungen unter Belastung eine wichtige Rolle (Abbau des Porenwasserdrucks). Die Dauer der Verflüssigung ist von den Entwässerungsbedingungen abhängig.

Steife, geologisch vorbelastete Tonböden sowie gleichartige bindige Formationen reagieren i.d.R. unempfindlich auf (kurzzeitige) Erschütterungen und besitzen demzufolge kein hohes Liquefaktionspotenzial. Kiese zeigen, wenn überhaupt, nur ein sehr kurzzeitiges Verflüssigungsverhalten, wobei im Allgemeinen keine destruktiven Schubverformungen auftreten [13],[23],[34],[42],[47],[55],[65],[66],[69],[71],[72].

Die Effekte der Bodenverflüssigung werden für das hier vorliegende Forschungsprojekt gezielt genutzt bzw. herbeigeführt. Durch die mittels des Schwingungsaggregats eingeleiteten

Vibrationen wird in unmittelbarer Umgebung der Rohrmanteloberfläche (maximal einige cm) eine fluidisierte Zone (Boden-Wasser-Film) aufgebaut, durch die infolge reduzierter Reibungswerte eine Verringerung der erforderlichen Einziehkraft bei der Installation der Rohrleitung resultiert.

### 3.4 Mantelreibung beim Rohreinzug

Beim grabenlosen Rohrvortrieb tritt infolge des Kontaktes von Rohroberfläche und umgebendem Medium Reibung auf, die, als Mantelreibung bezeichnet, vom Bohrgerät während des Rohreinzugs überwunden werden muss. Aufgrund der mit dem Einziehfortschritt stetig zunehmenden Reibfläche steigt die erforderliche Zugkraft kontinuierlich an. Ihr Maximum ist demzufolge erreicht, wenn der Ziehkopf am Zielpunkt der Bohrung austritt.

Aus physikalischer Sicht bezeichnet die Mantelreibung eine Scherspannung, die durch eine flächenbezogene Kraft charakterisiert ist und von maschinentechnischen, verfahrenstechnischen und bodenmechanischen Faktoren abhängt. Vor allem die Art des zu durchörternden Lockergesteins, insbesondere dessen Korngrößenverteilung, Wassergehalt und plastischen Eigenschaften sowie die Teufenlage der Bohrung und die Beschaffenheit der Rohroberfläche beeinflussen diese Spannungsgröße.

Die Mantelreibung  $\tau_m$ , die immer der Bewegungsrichtung des einzuziehenden Rohres entgegenwirkt, ist definiert als das Verhältnis der wirksamen Reibungskräfte  $F_R$  zur der im Baugrund befindlichen bewegten oder ruhenden Mantelfläche  $A_m$  des Produktrohres. Die auftretenden Reibspannungen setzen sich aus einem Haftspannungsanteil (tangentielle Adhäsion  $a$ ) und einem, dem Coulomb'schen Reibungsgesetz folgenden, Spannungsanteil  $\mu \cdot \sigma$  zusammen.

$$(3.29) \quad \tau_m = \frac{F_R}{A_m} = a + \mu \cdot \sigma$$

Unter Berücksichtigung empirisch ermittelter physikalischer sowie bodenmechanischer Kennwerte lässt sich dieser Ansatz weiter präzisieren:

$$(3.30) \quad \tau_m \approx a + (\mu_G \cdot K_V) \cdot (K_A \cdot \gamma \cdot \sqrt[3]{d_a^2 \cdot z_G})$$

mit

- $\tau_m$  = wirksame Mantelreibung am Produktrohr [kN/m<sup>2</sup>]  
 $a$  = tangentielle Adhäsionsspannung [kN/m<sup>2</sup>]  
 $\mu$  = Reibbeiwert zwischen Rohroberfläche und Baugrund  
 $\sigma$  = Spannungsanteil aus Überlagerungsdruck [kN/m<sup>2</sup>]  
 $\mu_G$  = Gleitreibungsbeiwert (empirisch ermittelt)  
 $K_V$  = Korrekturfaktor in Abhängigkeit der Reibungsgeschwindigkeit  
 $K_A$  = Adaptionsbeiwert  
 $\gamma$  = mittlere Wichte des Lockergesteins [kN/m<sup>3</sup>]  
 $z_G$  = Teufenlage/Mächtigkeit der überdeckenden Lockergesteinsschicht

Die tangentielle Adhäsionskraft  $a$  wirkt ausschließlich bei bindigen Lockergesteinen und kennzeichnet die Haftspannung zwischen verschiedenen Materialien bei parallel zur Grenzfläche angreifender Trennkraft. Sie ist direkt proportional zur Plastizität des Bodenmaterials, die durch die Plastizitätszahl  $I_p$  (nach DIN 18122-1) beschrieben wird. Der Einfluss der Adhäsion ist beim Übergang von der weichen zur steifen Konsistenz am intensivsten nachweisbar.

Abb. 3-14 zeigt die Wirkungsbereiche der Adhäsion bei bindigen Lockergesteinen in Abhängigkeit der Plastizität und Konsistenz.

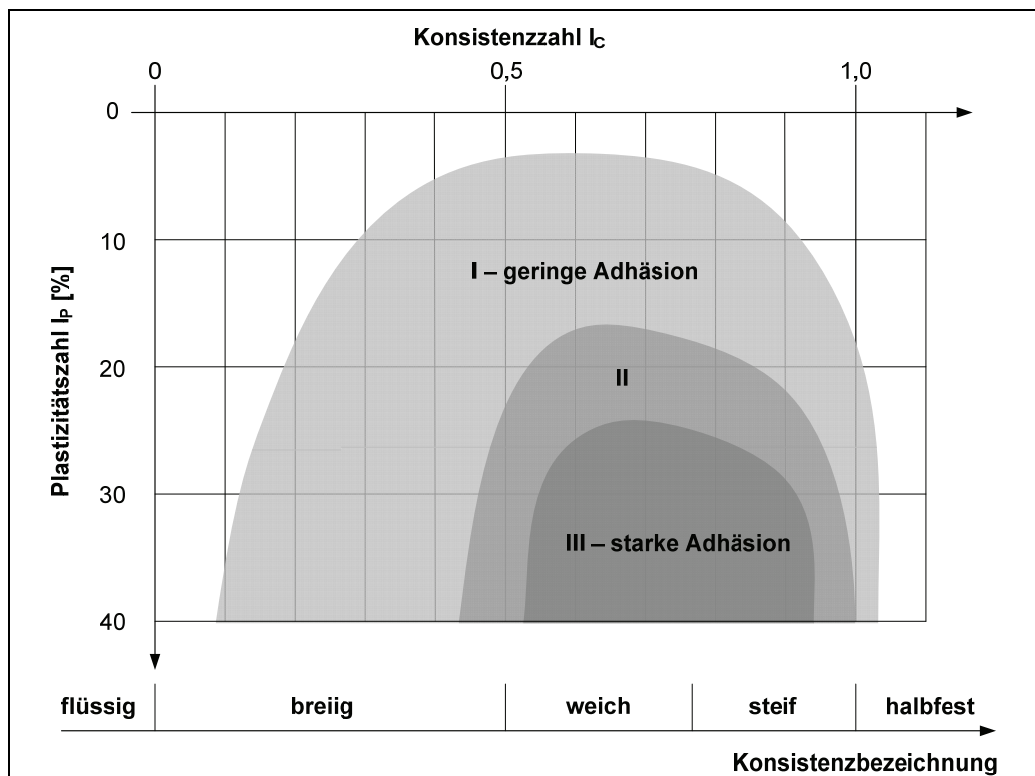


Abb. 3-14: Wirkungsbereiche der Adhäsion bei bindigen Böden

Die tangentielle Adhäsion kann bei Lockergesteinen in einem Konsistenzbereich von  $0,55 < I_p < 1,05$  näherungsweise unter Verwendung der Gleichung (3.31) bestimmt werden:

$$(3.31) \quad a \approx I_p \cdot (1 - 4 \cdot |I_c - 0,8|) \quad [kN / m^2]$$

mit

$I_p$  = Plastizitätszahl gemäß DIN 18122-1 [%]

$I_c$  = Konsistenzzahl gemäß DIN 18122-1 [-]

Die Plastizitätszahl  $I_p$  errechnet sich aus dem Wassergehalt  $W$  einer repräsentativen Probe an der Fließ- und Ausrollgrenze:

$$(3.32) \quad I_p = W_L - W_P \quad [\%]$$

mit

$W_L$  = Wassergehalt an der Fließgrenze [%]

$W_P$  = Wassergehalt an der Ausrollgrenze [%]

Zur Abschätzung des Tragverhaltens eines Lockergesteins wird die dimensionslose Konsistenzzahl  $I_c$  verwendet, die sich aus dem Wassergehalt und der Plastizitätszahl wie folgt ergibt:

$$(3.33) \quad I_c = \frac{W_L - W}{I_p} \quad [-]$$

mit

$W$  = Wassergehalt des Lockergesteins [%]

Zur Prognose der Mantelreibung für den Anwendungsfall des Rohreinzugs gilt, dass die effektiv wirkende tangentielle Adhäsion zwischen Rohroberfläche- und Bodenmaterial kleiner als die Kohäsion des Bodens (innere Scherkräfte zwischen den einzelnen Bodenkörnern) ist.

Neben der Adhäsion ist der Reibbeiwert  $\mu$  in die Betrachtungen einzubeziehen, der sich - wie oben gezeigt - aus dem Produkt des Gleitreibungsbeiwertes  $\mu_G$  und eines

---

lockergesteinsspezifischen Korrekturfaktors  $K_V$  zusammensetzt. Der Gleitreibungskoeffizient stellt für die Reibkomponenten ‚Rohrflächenmaterial - Lockergestein‘ keine Stoffkonstante dar, sondern hängt wesentlich von der Bodenbeschaffenheit und -zusammensetzung (Korngrößenverteilung, Dichte, Wassergehalt) sowie von der Oberflächenbeschaffenheit des Rohrmaterials und der Reibgeschwindigkeit ab. Letzt genannte kann analog zur Einziehgeschwindigkeit des Produktrohres verstanden werden.

Die Abhängigkeit des Reibungsbeiwertes von der Reibgeschwindigkeit verdeutlicht grafisch die sog. Stribeck-Kurve, die in Abb. 3-15 als Funktion des spezifischen Korrekturfaktors  $K_V$  dargestellt ist. Hieraus geht hervor, dass mit zunehmender Rohrbewegung bzw. -geschwindigkeit eine stetige Zunahme des Reibungskoeffizienten einhergeht. Mit dem Einsetzen der Bewegung geht die anfängliche Haftreibung (Reibgeschwindigkeit  $\approx 0$ ) in Gleitreibung über, bis sich ein Reibungsminimum einstellt, das von der Reibpaarung und der wirkenden Spannung abhängt. In Abhängigkeit der Reibungsgeschwindigkeit ist daher eine baugrundspezifische Korrektur erforderlich. Im Übergangsbereich zwischen Haft- und Gleitreibung treten sog. Slipstick-Effekte auf, die sich in Form eines permanenten Wechsels zwischen Haften und Gleiten äußern.

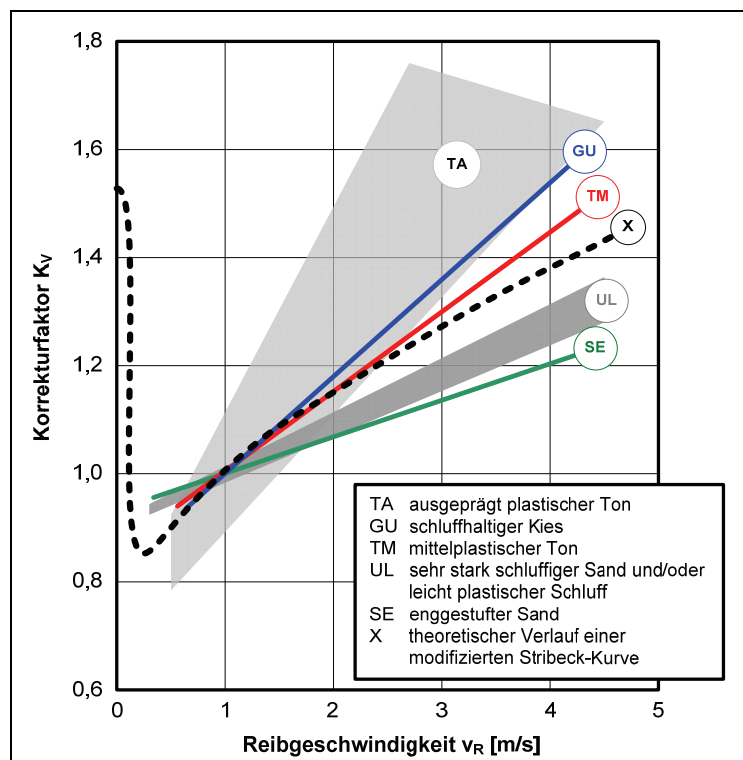


Abb. 3-15: Geschwindigkeitsspezifische Korrektur

Der oben beschriebene Zusammenhang von Reibkraft bzw. Einziehungskraft und Reib- bzw. Einziehgeschwindigkeit entspricht den Erfahrungen aus der Praxis beim Einziehvorgang von

Rohrleitungen mittels HDD und konnte auch im Rahmen der Technikumsversuche nachvollzogen werden.

Durch den in Gleichung (3.30) enthaltenen Adaptionseiwert  $K_A$  kann die vertikal wirkende Gebirgsspannung, resultierend aus dem Überlagerungsdruck, in die auf das Rohr wirkende Normalspannung umgerechnet werden. Hierbei findet die Gebirgsstabilität durch Integration des Winkels der inneren Reibung Berücksichtigung; der Adaptionseiwert kann durch folgende Regressionsgleichung abgeschätzt werden.

$$(3.34) \quad K_A \approx \frac{247,5}{\Phi^2} - \frac{1,695}{\Phi} - 0,0326$$

mit

$\Phi$  = Winkel der inneren Reibung [°]

Die nachstehende Tab. 3-4 zeigt exemplarisch einige ausgewählte Adaptionseiwerte.

Tab. 3-4: Adaptionseiwerte für ausgewählte Lockergesteine

Bodenart (gemäß Gesteinsklassifikation)	Reibungswinkel $\Phi$	Adaptionseiwert $K_A$
Fließende Lockergesteine, Schwimmsand, Sumpfboden, Löß und andere durch Wasser aufgelockerte Erde	17°	0,72
Locker gelagerte Böden, Sand, Aufschüttungen, feiner Kies	25°	0,31
Erdige Lockergesteine, Erdboden, Torf, nasser Sand	31°	0,17
weiche standfeste Lockergesteine, sandiger Lehm, Kies, Löß	39°	0,08
Kompakte trockene Lehme, lehmige Böden, weiche Kohle	45°	0,04
Verwitterte Festgesteine, Kiesboden, verwitterter Schiefer	56°	0,013

Die Gültigkeit des oben vorgestellten Ansatzes zur Abschätzung der Mantelreibung unter Berücksichtigung bodenphysikalischer Rahmenbedingungen erfolgt für die vorliegende Problemstellung beim HDD unter der Prämisse, dass ein nahezu vollständiger Verschluss des Ringkanals im Bohrloch bzw. in Teilbereichen gegeben ist, d.h. das umgebende Bodenmaterial befindet sich in direktem Kontakt zur Rohroberfläche. Vergleichbare Bedingungen stellen sich beim Vorhandensein von Bohrspülung ein.

Im bindigen Baugrund werden durch die im Rahmen der Forschungsarbeiten untersuchte Schwingungsapplikation Scherkräfte wirksam, die dazu führen, dass das im Korngerüst zusitzende Wasser mobilisiert wird und sich infolge dessen eine schmale Verflüssigungszone ausbildet. Diese wirkt beim Einziehen der Rohrleitung wie eine Gleitschicht und reduziert die Reibkräfte, respektive die erforderliche Zugkraft. Im nichtbindigen Boden führen die hochfrequenten Schwingungen zu einem zyklischen, kurzzeitigen Verlust des Oberflächenkontaktes zwischen Rohr und Bodenkörnern, woraus bei Überlagerung der Zugbewegung eine Reibungsminderung resultiert.

### **3.5 Bohrspülung**

Der Bohrspülung kommt bei Horizontalbohrprojekten eine besondere Bedeutung zu. Nachfolgend werden die wesentlichen Aufgaben und die Eigenschaften von Bohrspülungen beschrieben.

#### **3.5.1 Aufgaben**

Zu den wesentlichen Aufgaben einer Bohrspülung zählen die nachfolgend aufgeführten Aspekte [7], [45], [52]:

- Hydraulische Lösearbeit an der Bohrloch-Ortsbrust bzw. Übertragung der hydraulischen Energie beim Einsatz von Bohrlochsohlenmotoren,
- Abtransport des gelösten Bohrkleins durch den Ringraum zwischen Bohrlochwand und Bohrstrang zur Tagesoberfläche,
- Verzögerung bzw. Verhinderung der Sedimentation von Bohrkleinpartikeln bei Unterbrechung des Spülkreislaufs („In-Schwebelassen“ des Bohrkleins),
- Stabilisierung des Bohrkanals und Vermeidung von Nachfall,
- Reduzierung der Reibung des Bohrstranges bzw. des einzuziehenden Rohres (Schmierwirkung) sowie
- Kühlung der Bohrwerkzeuge.



### **HYDRAULISCHE LÖSEARBEIT / HYDRAULISCHE ENERGIEÜBERTRAGUNG**

Das Lösen des anstehenden Bodenmaterials an der Ortsbrust bzw. der Bohrlochsohle erfolgt im Lockergestein zum überwiegenden Teil auf hydraulische Weise durch das zu Strahlen gebündelte und über Düsen am Bohrwerkzeug austretende Spülmedium.

Bei Festgesteinsbohrungen kommen überwiegend Bohrlochsohlenmotoren zum Einsatz. In diesen, nach dem Moineau-Prinzip arbeitenden Schraubenmotoren, wird die zwischen dem schraubenförmigen Stator und einem ebensolchen Rotor entlang strömende Bohrspülung in kinetische Energie umgewandelt, wodurch der Bohrmeißel angetrieben wird.

### **BOHRKLEINTRANSPORT**

Das vom Bohrwerkzeug hydraulisch oder mechanisch gelöste Bodenmaterial wird vom Spülungsmedium (Wasser oder viskose Suspensionen) aufgenommen und im Ringraum zwischen Bohrstrang und Bohrlochwand nach übertage gefördert, wo es dem Aufbereitungsprozess zugeführt wird.

Das Transportvermögen von Bohrspülungen wird durch das volumetrische Verhältnis von Bohrklein zu Bohrspülung angegeben und liegt, je nach Bohrkleineigenschaften und Spülungszusammensetzung, zwischen 10 und 30%. Neben diesen Randbedingungen wird das Transportverhalten maßgeblich durch die Art der Strömung beeinflusst. Für das HDD-Verfahren ist ein sog. laminarer Stopfenfluss als günstig anzusehen.

### **„IN-SCHWEBEHALTEN“ DES BOHRKLEINS**

Eine weitere wichtige Aufgabe der Bohrspülung ist das Verzögern bzw. die Verhinderung des Absinkens von Bohrkleinpartikeln während der Unterbrechung des Spülvorgangs. Der Sedimentationsweg beim HDD ist - im Gegensatz zur Vertikalbohrtechnik - sehr klein (maximal der Bohrlochdurchmesser), daher sollte sich beim Stillstand des Pumpenstroms möglichst schnell eine gelartige Spülungsstruktur aufbauen, die gewährleistet, dass die Feststoffpartikel in Schwebe gehalten werden, bis die Spülungszirkulation wieder einsetzt.

Maßgeblich für diese Eigenschaft ist die sog. Thixotropie, die durch die Bingham'sche Theorie beschrieben wird. Hierbei wird davon ausgegangen, dass sich das Spülungsmedium wie ein Feststoff verhält und erst beim Erreichen der Bingham'schen Fließgrenze (Fließen infolge Scherbeanspruchung) schlagartig in eine Flüssigkeit verwandelt.

Die besonderen Eigenschaften von thixotropen Bohrspülungen sind nachfolgend in Kapitel 3.5.2 beschrieben.

### **STABILISIERUNG DES BOHRKANALS**

Da die mittels HDD-Technik hergestellten Bohrlöcher im Lockergestein in der Regel unverrohrt sind, erfolgt die Stützung von Bohrlochwand und -firste allein durch die im Bohrloch befindliche Spülung. Besonders bei schwierigen Baugrundverhältnissen, wie beispielsweise in kiesigen Böden, stellt diese Aufgabe eine große Herausforderung dar.

Neben anderen Aspekten kommt vor allem der Dichte des Spülmediums eine besondere Bedeutung zu. Da HDD-Bohrungen überwiegend in wassergesättigten Bodenformationen hergestellt werden, sollte die Dichte der Spülung größer als die Dichte des anstehenden Grundwassers sein.

Die Stabilisierung des Bohrlochs wird ferner durch einen Überdruck der Bohrspülung gegenüber dem anstehenden Grundwasser und Erdreich von mindestens 0,2 bar (je nach Baugrundeigenschaften) erreicht. Durch die sich einstellende Druckdifferenz wird an der Bohrlochwand ein Filtrationsprozess ausgelöst, der dazu führt, dass das enthaltene Wasser in den Baugrund verdrängt wird. Die im Spülmedium enthaltenen Feststoffteilchen, insbesondere das Bentonit, werden in den Porenzwischenräumen absedimentiert und bilden einen sog. Filterkuchen. Durch das Aufquellen der Tonminerale werden die Porenräume kraftschlüssig ausgefüllt.

Die Filterkuchenbildung wird durch die Zusammensetzung der Spülung beeinflusst. Bohrspülungen mit einem guten Wasserbindevermögen bilden einen dünnen, glatten und elastischen Filterkuchen, der dem Bohrstrang und dem einzuziehenden Produktrohr gute Gleiteigenschaften bietet. Zur Erhöhung des Wasserbindevermögens werden der Spülung verschiedene Additive zugesetzt. Suspensionen mit geringem Wasserbindevermögen führen zur Bildung einer dicken, schwammigen und brüchigen Filterkuchenschicht. Hierdurch verengt sich der Bohrkanal und das enthaltene Wasser entweicht in den Baugrund. Die Ausbildung eines derartigen Filterkuchens begünstigt das Festwerden des Bohr- bzw. Produktrohrstranges während der Pilotbohrung - bzw. des Einziehvorgangs.

### **REDUZIERUNG DER REIBUNG**

Vor allem während des Einziehvorgangs des Produktrohres treten mit zunehmender Einziehlänge teilweise sehr hohe Reibwerte auf, die vom Bohrgerät überwunden werden müssen. Bei entsprechender Spülungszusammensetzung können in günstigen Fällen sehr niedrige Reibungsbeiwerte erzielt werden, wodurch sowohl die Druck- und Zugkräfte als auch die erforderlichen Drehmomente deutlich verringert werden können.

## KÜHLUNG DER BOHRWERKZEUGE

Die beim Bohrprozess auftretende Reibungswärme, hervorgerufen vor allem durch den mechanischen Lösevorgang beim Eingriff des Bohrmeißels (insbesondere im Festgestein), wird von der Bohrspülung aufgenommen und abgeführt.

### 3.5.2 Rheologische Eigenschaften

Je nach Einsatzfall muss die verwendete Bohrspülung auf die jeweiligen projektspezifischen Anforderungen des Baugrunds individuell abgestimmt werden.

Im einfachsten Fall, d.h. bei günstigen Baugrundvoraussetzungen, kann als Bohrspülung reines Wasser verwendet werden. In der Regel erfordern baugrundtechnische Rahmenbedingungen jedoch die Verwendung besonderer Bohrspülungen (Suspensionen), die die o.g. Aufgaben erfüllen müssen. Zur gezielten Steuerung der rheologischen Eigenschaften werden der Suspension Hilfsmittel zugegeben.

Bohrspülungen setzen sich prinzipiell aus den folgenden Teilelementen additiv zusammen:

- Fluidphase (i.d.R. Wasser)
- Strukturbildner (schichtsilikatische Tonminerale, z.B. Bentonit, zur Stabilisierung der Spülung)
- Schutzkolloide (Polymerverbindungen zur Bildung eines Filterkuchens)
- Verflüssiger (Senkung der Viskosität, dadurch Erhöhung der Pumpbarkeit)
- Beschwerungsmittel (Erhöhung der Spüldichte und des hydraulischen Drucks im Bohrloch, i.d.R. bei oberflächennahen Bohrungen nicht erforderlich)
- pH-Wert-Regulatoren (Einfluss auf Quellfähigkeit der Tonminerale und Wirkung der Schutzkolloide)
- Stopfmittel (z.B. Holzfasern, Verhinderung von Spüungsverlusten durch Abdichtung von Klüften und Rissen im Gebirge)

Bohrspülungen besitzen ein speziell angepasstes Viskositätsprofil, das in erster Linie durch die Thixotropie des Mediums beschrieben wird. Bei niedrigen Fließgeschwindigkeiten im Bohrkanal (0,05 bis 0,1 m/s) weist die Spülung eine halbfeste Gelstruktur mit einer Fließgrenze auf, die die Sedimentation der Bohrkleinpartikel verhindert.

Beim Eintrag von Bewegungsenergie bzw. Schubspannungen durch die Spülpumpe wird die Gelstruktur an den Grenzflächen ‚Spülung-Bohrgestänge‘ und ‚Spülung-Bohrlochwand‘ durch ein lokal begrenztes, erhöhtes Schergefälle in eine fluide Phase (Sol) überführt. Die Cutting-beladene Bohrspülung gleitet darauf wie auf einem Schmierfilm aus dem Bohrkanal (sog. Plugflow).

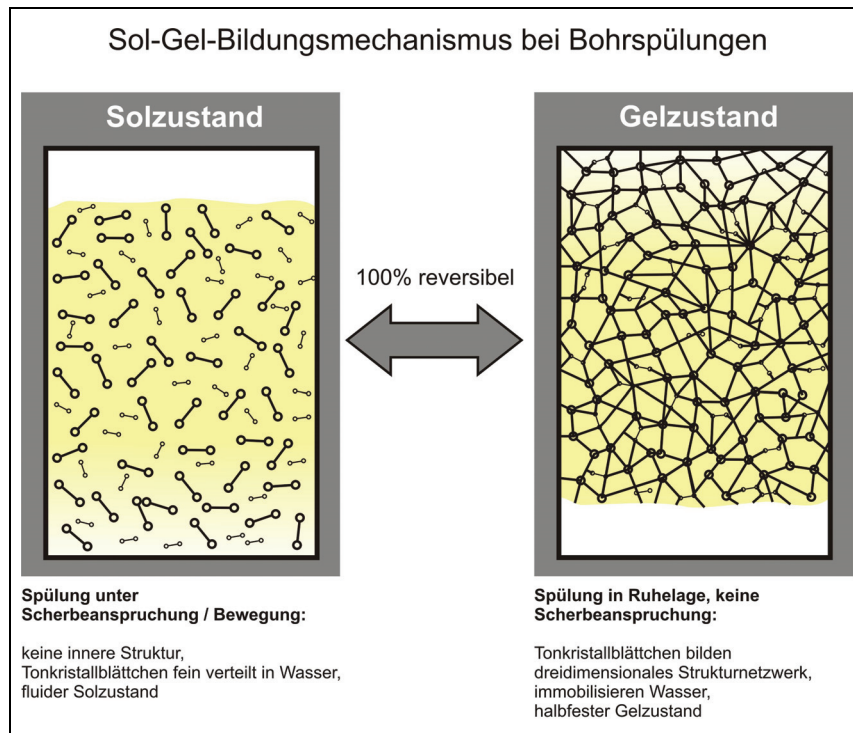


Abb. 3-16: Sol-Gel-Bildungsmechanismus bei Bohrspülungen [15]

Die Kraft, die erforderlich ist, um ein thixotropes Fluid in Bewegung zu versetzen, entspricht der Fließgrenze nach dem Bingham'schen Fließmodell, ist aber im Gegensatz zu dieser nicht konstant, sondern zeitabhängig, d.h. je länger sich ein thixotropes Medium im Ruhezustand befindet, desto größer ist die erforderliche Scherkraft zur Wiederherstellung der Fließfähigkeit.

Die in der Horizontalbohrtechnik verwendeten Bohrflüssigkeiten besitzen ein sog. pseudoplastisches (strukturviskoses, scherverflüssigendes) Fließverhalten. Pseudoplastische Substanzen verringern infolge eines zunehmenden Schergeschwindigkeitsgefälles ihre Viskosität. Bei sehr kleinen und sehr hohen Schergeschwindigkeiten verhält sich das Medium annähernd wie ein Newton'sches Fluid, d.h. die Schergeschwindigkeit ist der Schubspannung proportional bzw. die Viskosität ist mehr oder weniger unabhängig vom Geschwindigkeitsgefälle. Ab einer bestimmten (kritischen) Schergeschwindigkeit bzw. bereits bei geringen Tonmineralgehalten ( $\geq 1\%$ ) weicht das Fließverhalten vom idealen Verhalten ab; die Viskosität nimmt ab und es besteht kein linearer Zusammenhang mehr zwischen Schergeschwindigkeit und Schubspannung. Eine Beschreibung der Fließeigenschaften durch das Newton'sche Schubspannungsgesetz ist ab diesem Punkt nicht mehr gegeben [15].

Abb. 3-17 zeigt das Fließverhalten verschiedener Fluide als Abhängigkeitsverhältnis von Schubspannung und Schergeschwindigkeitsgefälle.

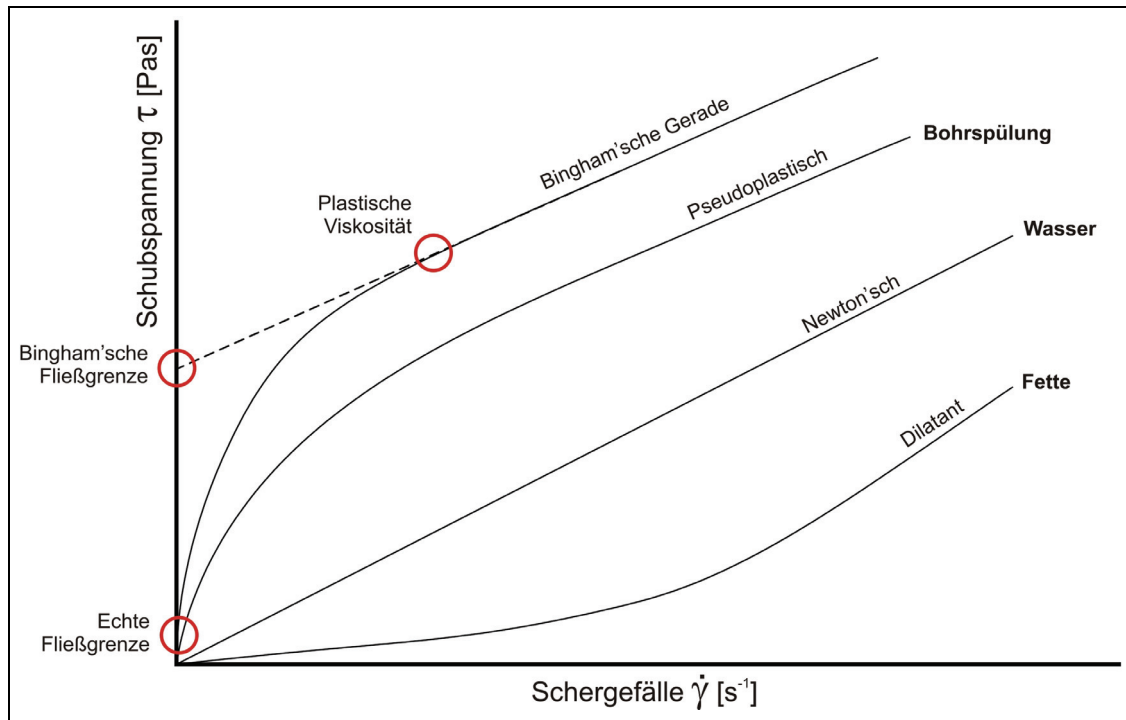


Abb. 3-17: Fließverhalten verschiedener Flüssigkeiten

Pseudoplastische Fluide werden im Wesentlichen charakterisiert durch die Parameter

- plastische Viskosität,
- scheinbare Viskosität,
- Bingham'sche Fließgrenze und
- Gelstärke.

### PLASTISCHE VISKOSITÄT

Tritt bei viskosen Suspensionen eine Fließgrenze auf, wird das Fließverhalten als plastisch bezeichnet. In diesem Fall ist eine äußere Kraft notwendig, um die Gerüststrukturen zu zerstören und das plastische System zum Fließen zu bringen.

Die plastische Viskosität kennzeichnet den Punkt einer Fließkurve, in dem eine Flüssigkeit ihre geringste Viskosität aufweist, was bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten der Fall ist. Ihr Wert wird durch die Steigung der Fließkurve oberhalb der Fließgrenze, also im plastischen Bereich, angegeben. Bei Bohrspülungen repräsentiert dieser Punkt den Einfluss des Feststoffgehalts der Spülung, wobei die plastische Viskosität mit zunehmendem Feststoffanteil zunimmt.

### **SCHEINBARE VISKOSITÄT**

Die Abhängigkeit der Schubspannung von der Schergeschwindigkeit ist bei Nicht-Newton'schen Flüssigkeiten keine lineare Beziehung. Damit ist auch der Quotient aus Schubspannung und Schergeschwindigkeit, der als effektive Viskosität bezeichnet wird, nicht konstant sondern abhängig von den Deformationsbedingungen.

Die Quotientenbildung aus Schubspannung und Schergeschwindigkeit, bezogen auf einen bestimmten Ort, beispielsweise die Bohrlochwand, und unter der Annahme Newton'schen Verhaltens liefert eine mittlere Viskosität aus den effektiven Viskositätswerten, die sich in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Scherbedingungen einstellen. Diese mittlere Viskosität liegt als stoffcharakterisierende Größe nicht wirklich vor, da der Zustand des Mediums eine Funktion der Beanspruchungsbedingungen ist, und wird deshalb als scheinbare Viskosität bezeichnet.

Die scheinbare Viskosität nimmt mit steigendem Schergefälle ab. Die Fließkurve verläuft zunächst linear und entspricht in diesem Bereich ‚scheinbar‘ demjenigen eines Newton'schen Fluids. Die scheinbare Viskosität geht im weiteren Verlauf in die plastische Viskosität über.

### **BINGHAM'SCHE FLIEßGRENZE**

Die Bingham'sche Fließgrenze kann als Maß für die Tragfähigkeit von Bohrspülungen angesetzt werden. Als Fließgrenze eines Stoffes wird seine Eigenschaft bezeichnet, Schubspannungen bis zu einem bestimmten Maximum aufzunehmen, ohne dass plastische Verformungen eintreten. Die durch energetische Wechselwirkungen zwischen den suspendierten Tonteilchen herrschenden Kräfte nehmen mit zunehmendem Wert der Fließgrenze zu und umgekehrt. Damit eine Fließbewegung stattfinden kann, müssen die Spülungen ggf. gebrochen werden, was mit einer Abnahme der Viskosität einhergeht.

Im Fließdiagramm lässt sich die Bingham'sche Fließgrenze dadurch konstruieren, indem eine Gerade asymptotisch an den oberen, annähernd geraden Kurvenabschnitt (oberhalb der Fließgrenze) gelegt und bis zum Schnittpunkt mit der Ordinate verlängert wird. Dieser Schnittpunkt repräsentiert die Bingham'sche Fließgrenze.

### **GELSTÄRKE**

In der Bohrtechnik wird als Maß für die Thixotropie bzw. die Tragfähigkeit der Bohrspülung üblicherweise die Gelstärke verwendet. Diese bezeichnet diejenige Scherspannung, die erforderlich ist, um ein Fluid nach einer bestimmten Ruhepause wieder in Bewegung zu versetzen bzw. sie bildet ein Maß dafür, ob und wie sehr die Spülung dazu neigt, durch Aneinanderlagerung der Tonteilchen eine kartenhausähnliche Gelstruktur aufzubauen. Die Gelstärke erhöht sich mit zunehmendem Tonanteil.

Für spezielle Anwendungen in der HDD-Technik, wie beispielsweise bei der Unterquerung setzungsempfindlicher Objekte (Straßen, Bahntrassen, Landebahnen etc.) ist eine langfristige Stabilisierung des Bohrkanals notwendig, da andernfalls die Gefahr von Setzungsschäden besteht, deren Sanierung mit hohen Kosten verbunden ist. Zu diesem Zweck wurden spezielle **selbsterhärtende Bohrspülungen** entwickelt. Deren rheologische Eigenschaften sind zunächst mit denen konventioneller (Bentonit-)Spülungen vergleichbar. Jedoch bilden diese allmählich ein erdfestes Gefüge aus, wodurch ein dauerhaft stabiler, erosionssicherer Verschluss des erbohrten Hohlraums erzielt wird [14].

Der Bohrspülung kommt aufgrund ihrer thixotropen Eigenschaften für das vorliegende Forschungsprojekt eine zentrale Bedeutung zu, da im Falle der Verfestigung bzw. der Ausbildung eines schwammig-brüchigen Filterkuchens erhöhte Reibwerte beim Einziehen auftreten können, die das Festwerden der Rohrleitung begünstigen.

Die gezielte Einleitung von hochfrequenten Schwingungen kann hierbei dazu beitragen, das Risiko des Festwerdens der Rohrleitung zu verringern, da einerseits erreicht werden kann, die Spülung in Pumppausen in fluider Phase zu halten und die Vibrationen andererseits dazu führen können, einen verfestigten Filterkuchen aufzulösen, also Verflüssigungseffekte verbunden mit der Ausbildung eines Gleitfilms im Bereich der Rohrwandung herbeizuführen.

## **4 Stand der Technik der Schwingungsapplikation im Bau- und Bohrwesen**

Vibrationstechnologien in der Bohrtechnik sind entwicklungsgeschichtlich betrachtet bereits seit über einem halben Jahrhundert in Anwendung und mittlerweile vielfach in der Praxis erprobt. Beschränkten sich schwingungstechnische Applikationen ursprünglich auf den Bereich der Tiefbohrtechnik, so wurden im Laufe der Entwicklung auch andere Einsatzfelder für diese Technik erschlossen. Heutige Anwendungsbereiche sind vorrangig Bohrungen für umwelt- und aufschlusstechnische Zwecke, wobei eine Reihe von Vorteilen gegenüber konventionellen Bohrverfahren genutzt und umgesetzt werden.

Im Folgenden sollen einige ausgewählte vibrationstechnische Beispiele, die in der Praxis in Anwendung sind, vorgestellt werden.

### **4.1 Vibrationsrammung**

Die Vibrationsrammung findet häufig Anwendung bei der Installation bzw. Demontage von vertikalen Gründungspfählen und Spundwänden. Das Verfahren wurde ursprünglich aus der sog. Schlagrammung entwickelt, wobei ein Rammkörper mit Hilfe eines herabfallenden Gewichts in den Boden eingeschlagen wird. Um die daraus resultierenden Nachteile in Form von Lärm und starken, impulsartigen Bodenerschütterungen zu kompensieren, wurde die Vibrationsrammung entwickelt.

Das Wirkprinzip der Vibrationsrammung beruht auf der harmonischen Erregung des Rammguts, wobei eine Gefügeumlagerung des Bodenmaterials stattfindet und die Reibung zwischen Boden und Rammkörper (Mantelreibung) sowie der Spitzenwiderstand (Fußwiderstand) deutlich reduziert werden. Gegebenenfalls treten an den Grenzflächen zwischen Boden und Rammgut Bodenverflüssigungseffekte auf, woraus eine weitere Verringerung des Rammwiderstandes resultiert. Die Einbringung des Rammgutes in den Baugrund erfordert in diesem Zustand nur noch relativ geringe statische Kräfte, die entweder durch das Eigengewicht des Körpers und der Schwingungsvorrichtung und/oder ggf. durch eine zusätzliche Vorschubeinrichtung (sog. Mäkler) aufgebracht werden.





Abb. 4-1: Vibrationsbär einer Spundwandramme

Ein Vorteil des Verfahrens besteht darin, dass das Rammgut mit derselben maschinellen Ausrüstung sowohl einvibriert als auch gezogen werden kann.

Die harmonische Schwingungserregung wird durch gegenläufig rotierende Unwuchtsegmente im sog. Vibrationsbären erzeugt. Durch diese Anordnung der Unwuchtmassen überträgt die Vorrichtung eine oszillierende und in einer vertikalen Achse orientierte Schwingung auf das Rammgut. Die Schwingungen werden mittels eines sog. Isolators vom Trägergerät entkoppelt.

Abb. 4-2 zeigt schematisch das Prinzip der Vibrationsrammung.

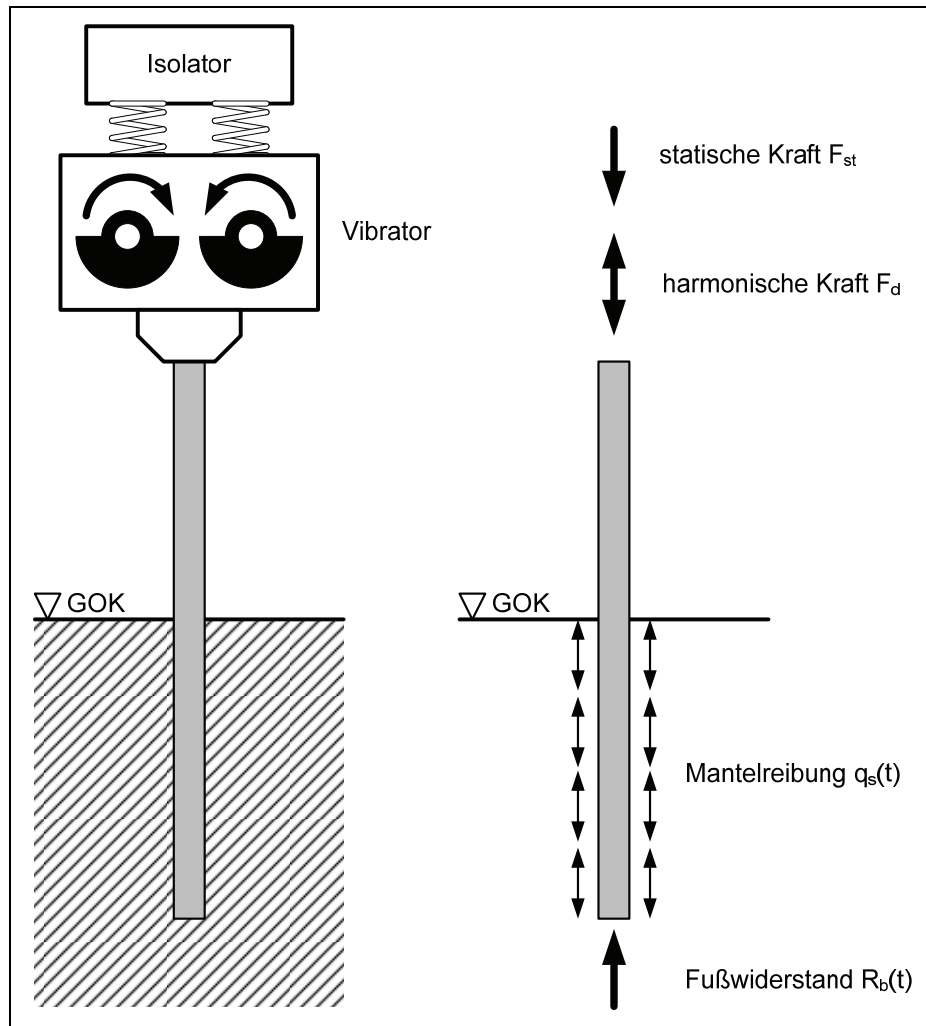


Abb. 4-2: Funktionsprinzip der Vibrationsrammung

Vibrationsrammen werden i.d.R. hydraulisch angetrieben. Die Schwingungsfrequenz wird durch die Drehzahl der Unwuchtelemente bestimmt und kann, um einen optimalen Rammfortschritt zu gewährleisten, speziell auf die Gegebenheiten des Baugrunds eingestellt werden. Als problematisch stellt sich dabei die Tatsache dar, dass beim Beschleunigen und Abbremsen des Vibrators bestimmte niedrige kritische Frequenzbereiche durchlaufen werden, die den Baugrund sowie angrenzende Objekte in Eigenschwingung versetzen können, was u.U. Verdichtungs- und Setzungseffekte bzw. Schäden an baulichen Substanzen hervorrufen kann. Bei modernen Vibrationsaggregaten ist es daher möglich, bei konstanter Fliehkraft die Frequenz und entsprechend das statische Unwuchtmoment den Bodeneigenschaften anzupassen. Die Hauptforderung dabei besteht darin, den kritischen Resonanzfrequenzbereich zu umgehen bzw. möglichst schnell zu durchlaufen [1], [3], [5], [24], [63].

## 4.2 Sonic Drilling

Das Sonic Drilling findet Anwendung in den Bereichen Geotechnik und Bergbau (z.B. zur Herstellung von Kernbohrungen), Umwelttechnik sowie im Brunnenbau (z.B. zum Einbringen von Brunnenrohren in den Untergrund). Das Verfahren ist für eine Vielzahl unterschiedlicher Bodenarten geeignet, wie beispielsweise Sand, Schluff und Ton, wobei auch inhomogene Formationen durchörtert werden können. In Grenzen können auch Festgesteine durchbohrt werden.

Bei dieser Technologie wird durch hochfrequente, mechanische und axial gerichtete Schwingungen im Bereich von 100 bis 200 Hz das vibrierende Bohrgestänge unter leichtem Andruck in den Untergrund eingefahren. Das Bohrgestänge überträgt die ihm aufgeprägten Vibrationen auf die in direktem Kontakt stehenden Bodenpartikel. Im Bereich der Kontaktfläche kommt es zu einer partiellen Verflüssigung des umgebenden Bodenmaterials, woraus eine Reduzierung des Eindringwiderstandes und damit ein vergleichsweise sanftes Einfahren des Gestänges in den Untergrund resultieren. Das gelöste Bodenmaterial wird seitlich in die Bohrlochwand verdrängt. In Festgesteinen bewirken die Vibrationen (in Überlagerung mit der Rotationsbewegung) eine zusätzliche Zerstörung des Gesteins, wobei sich Bruchstücke ausbilden, die mit einer Bohrspülung (Druckluft, Klarwasser oder Spülung mit Zusätzen) abtransportiert werden müssen.

Aufgrund der bodenverdrängenden Verfahrensweise kann in Lockergesteinsformationen im Allgemeinen auf eine Bohrspülung verzichtet werden, was sich besonders in empfindlichen Bodenschichten, bei der Gewinnung von Bohrkernen oder bei der Herstellung von Bohrungen zur Trinkwasserversorgung vorteilhaft auswirkt, da in diesem Fall nur eine geringe Störung des Bodengefüges stattfindet sowie keine Kontamination durch Bohrspülung bzw. Spülungszusätze erfolgt.

Eine Sonic Drilling Bohranlage entspricht im Wesentlichen dem Aufbau eines standardmäßigen Rotationsbohrgerätes und unterscheidet sich hauptsächlich durch die Konstruktion des Kraftdrehkopfes, in dem die Schwingungseinheit, bestehend aus einem Oszillator mit gegenläufig rotierenden Unwuchtsegmenten (entspr. Abb. 4-2), integriert ist. Die erzeugten Vibrationen (zyklische Auf- und Abwärtsbewegung) werden bei gleichzeitiger Rotation des Bohrstranges auf das Bohrwerkzeug übertragen; eine zusätzliche Andruckkraft wird mittels einer Bohrlafette mit Vorschubeinrichtung realisiert.

Das Sonic Drilling Verfahren erlaubt das Abteufen von Bohrungen mit einem geradlinigen Verlauf unter verschiedenen Eintrittswinkeln. Verglichen mit üblichen Standardbohrgeräten lässt sich durch das Sonic Drilling ein um den Faktor 2 bis 3 höherer Bohrfortschritt erreichen. Realisierbare Bohrungslängen liegen im Bereich von maximal 300 m, der maximale Bohrlochdurchmesser beträgt ca. 300 mm [62], [64].

### 4.3 Pipe Vibration Technologie

Die sog. Pipe Vibration Technologie wurde zur Lösung einer speziellen Problemstellung in der Tief- bzw. Vertikalbohrtechnik entwickelt. Ein möglicher und sich häufig ereignender Schadensfall in der Tiefbohrtechnik ist - wie in der Horizontalbohrtechnik auch - das Festwerden des Bohrstranges während des Bohrprozesses oder der Futterrohre während der Komplettierungsarbeiten. Grundsätzlich mögliche Ursachen dafür sind:

- hoher Gehalt an Feststoffen im Bohrloch (Bohrklein, Nachfall) in Kombination mit mangelhaftem Feststoffaustrag durch die Spülung,
- ein Bohrloch mit Untermaß, hervorgerufen durch die verschleißbedingte Kaliberabnahme des Bohrmeißels, die Ausbildung eines zu dicken Filterkuchens, quellende Tone und/oder Nachfall,
- die Ausbildung eines sog. ‚Schlüssellochs‘ bei einseitiger Erweiterung des Bohrkanals bedingt durch einen ausknickenden Bohrstrang sowie
- die Ausbildung eines Differenzdruckes (Differential Pressure Sticking).

In der Praxis sind verschiedene konventionelle Möglichkeiten und Verfahren in Anwendung, um die o.g. Schadensfälle zu beheben bzw. zu verhindern, wie beispielsweise ein permanentes Anheben und Absenken des Bohrstranges außerhalb des eigentlichen Bohrvorgangs, das Einpumpen von Hilfsflüssigkeiten zur Reduzierung der Dicke des Filterkuchens (Freispülen) und/oder das Überbohren des festsitzenden Gestänges bzw. Futterrohres.

Alternativ bietet auch die Anwendung der Vibrationstechnologie eine Möglichkeit zur Lösung eines festgefahrenen Bohrstranges. In den USA wurde ein Verfahren entwickelt, bei dem eine Vibrationseinheit übertägig auf dem freien Ende des Bohrgestänges installiert wird und - ähnlich dem Verfahren der Vibrationsrammung - axial gerichtete Schwingungen über ein separates Innengestänge punktgenau an die Lokation des festsitzenden Bohrstrangabschnitts eingeleitet werden [9], [79].



Abb. 4-3: Pipe Vibration - Vibrationseinheit zum Lösen eines festsitzenden Vertikalbohrstranges [79]

Vor allem dem oben erwähnten Differenzdruck (Differential Pressure Sticking) kommt im Hinblick auf die Applikation von Vibrationstechnologie eine besondere Bedeutung zu.

Unter dem Differential Pressure Sticking wird das Festwerden eines Teils des Bohrstranges, gewöhnlich der Schwerstangen im unteren Bereich der Bohrung, verstanden. Ursache dafür ist das Eindrücken des Bohrstangenabschnitts in den Spülungsfilterkuchen am Bohrlochstoß. Während eine Seite des Bohrstranges durch den Filterkuchen eingeschlossen ist, wird die gegenüberliegende Seite durch den hydrostatischen Druck der Bohrspülung beaufschlagt, was das Eindrücken infolge einer ungleichmäßigen Druckverteilung weiter verstärkt. Dieser Umstand führt zu einem Auspressen und Schrumpfen des Filterkuchens, wodurch die inneren Spannungen erhöht werden. Daraus resultiert eine deutliche Steigerung der Reibungskräfte zwischen der Rohrmanteloberfläche und dem Filterkuchen.

Voraussetzungen für das Entstehen des Differential Pressure Sticking sind:

- das Anliegen des Bohrstranges an der Bohrlochwandung bei Stillstand des Bohrvorganges,
- das Vorhandensein einer permeablen Bodenformation,
- ein erhöhter hydrostatischer Bohrlochdruck gegenüber dem umgebenden Bodenmaterial sowie
- die Bildung eines Spülungsfilterkuchens.

Nachstehende Abb. 4-4 zeigt schematisch den Mechanismus des Differential Pressure Sticking. Grundsätzlich können die in diesem Zusammenhang beschriebenen Effekte auch bei horizontalen bzw. geneigten Bohrungen auftreten.

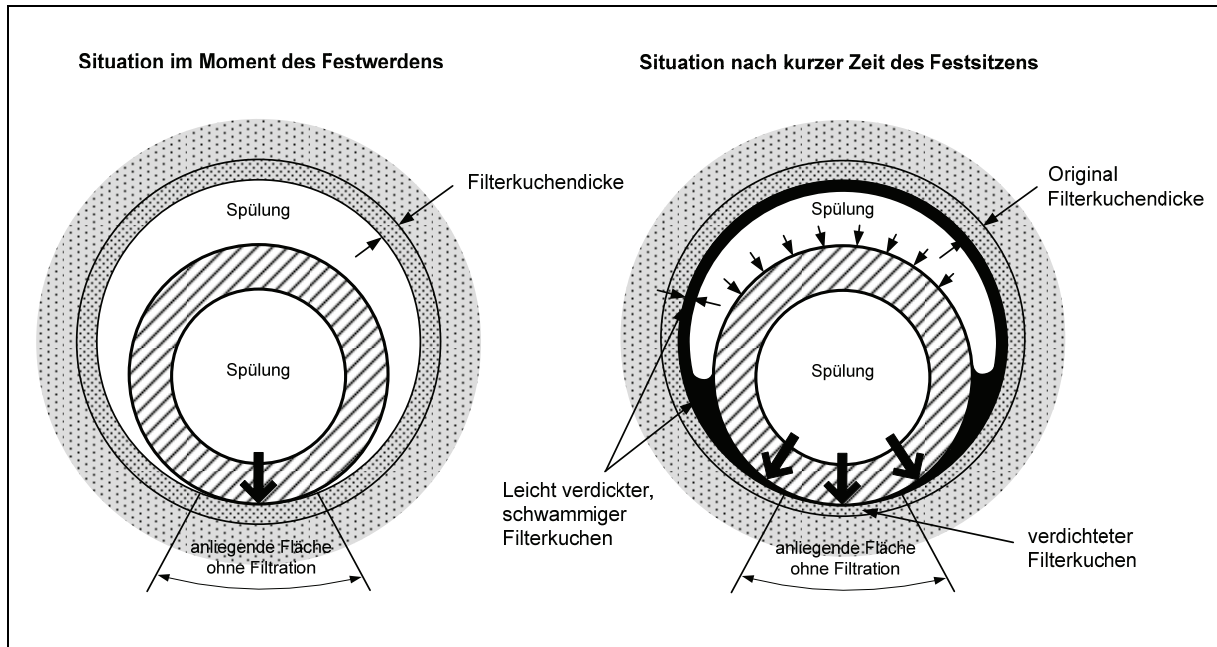


Abb. 4-4: Mechanismus des Differential Pressure Sticking

Die mittels der Pipe Vibration Technologie gezielt eingebrachten Schwingungen führen zu einer Fluidisierung des Filterkuchens, wodurch die Haftungseffekte aufgehoben werden. Ferner bewirken die Vibrationen eine Verringerung der Reibung zwischen dem Bohrstangenstahl und dem umgebenden Material im Ringraum und am Bohrlochstoß. Ein weiterer Effekt ergibt sich aus der durch die axial eingebrachten Schwingungen resultierenden zyklischen Durchmesseränderung der Bohrstangen. Während der Abwärtsbewegung der Schwungmasse bilden sich im Rohrmaterial Druckspannungen aus, aus der Aufwärtsbewegung der Unwuchtmasse resultieren Zugspannungen. Die Spannungen führen zu einer zyklischen elastischen Stauchung und Dehnung des Rohrmaterials in Kombination mit Querkontraktion und -dehnung. Der Betrag dieser Formänderung ist abhängig vom Elastizitätsmodul des verwendeten Bohrstahls sowie vom Durchmesser und der Wandstärke der Bohrstangen. Die sich ergebende pulsierende Durchmesseränderung führt zu einem Kontaktverlust zwischen Bohrstrang und Bohrlochwand und damit zu einer Reduzierung der Reibung.

In der Praxis wurden mittels des Pipe Vibration Verfahrens festsitzende Bohrstränge bis in einer Teufe von 3.440 m erfolgreich gelöst. Der Durchmesser des Gestänges betrug in diesem Fall 6½“.

Es bleibt anzumerken, dass für besagtes Verfahren keine allgemeingültige Aussage zu der verwendeten Schwingungsintensität getätigt werden kann, da diese Größe für jeden Anwendungsfall individuell eingestellt werden muss [79].

#### **4.4 Tiefenverdichtung**

Die Tiefenverdichtung (deep compaction) ist ein klassisches Beispiel für ein Verfahren, bei dem die Vibrationstechnik im Bergbau und Bauwesen Anwendung findet. Das Verfahren dient dazu, das geotechnische Risiko in geophysikalisch sensiblen Bereichen durch Erhöhung der Lagerungsdichte des Untergrundes zu minimieren. Dies betrifft vor allem geologische Lockergesteinsformationen sowie künstlich aufgeschüttete Böden, die beispielsweise aufgrund von Grundwasserstandsänderungen und/oder Erschütterungen als setzungs- bzw. sackungsgefährdet eingestuft werden und infolge dessen stabilitätsspezifische Anforderungen nicht in ausreichendem Maße erfüllen.

Die Verdichtung des anstehenden Bodenmaterials erfolgt in nichtbindigen Formationen durch eine Reduzierung des Porenvolumens zwischen den einzelnen Bodenkörnern, wodurch sich Eigenschaften, wie beispielsweise der Reibungswinkel, die Scherfestigkeit und das Verformungsmodul, erhöhen und damit die Tragfähigkeit des Baugrundes verbessern.

Bei der Tiefenverdichtung lassen sich Bereiche des Baugrunds kompaktieren, die von der Oberfläche aus nicht mehr erreicht werden können und tiefer als 2 m unterhalb der Geländeoberkante liegen. Je nach Untergrundverhältnissen können Tiefen bis zu 50 m, in Ausnahmefällen und mit Sonderausstattungen auch 70 m und mehr erreicht werden. Dabei wird eine vertikal an einem Hubseil hängende Rüttellanze, die aus einem Stahlbehälter mit integriertem, meist hydraulisch betriebenem Vibrationsaggregat besteht, unter Ausnutzung des Eigengewichts senkrecht in den Boden eingefahren. Durch Aufsatzrohre kann der Tiefenrüttler auf die für den Einsatz erforderliche Länge angepasst werden. Die Verbindung zwischen den Aufsatzrohren und der Rüttlereinheit (Vibratorzelle) erfolgt durch ein Gelenk, so dass die Spitze der Lanze aufgrund der Radialschwingung eine Taumelbewegung ausführt. Der Vibrationsprozess wird zumeist durch die Zugabe von Wasser, das an der Spitze des Rüttlers unter hohem Druck austritt (sog. Nassverfahren, Vibroflotation), oder auch durch das Einblasen von Druckluft (sog. Trockenverfahren), unterstützt. Einer anfänglichen Verflüssigung des gesättigten Bodenmaterials infolge der eingeleiteten Schwingungen folgt eine Verdichtung und Setzung bei gleichzeitigem Abbau des Porenwasserdrucks. Die hieraus resultierenden Volumendefizite werden durch kontinuierliches Nachrutschen von Bodenmaterial kompensiert, so dass sich an der Tagesoberfläche trichterförmige Erdlöcher ausbilden, in die weiteres Erdmaterial nachgefüllt wird.



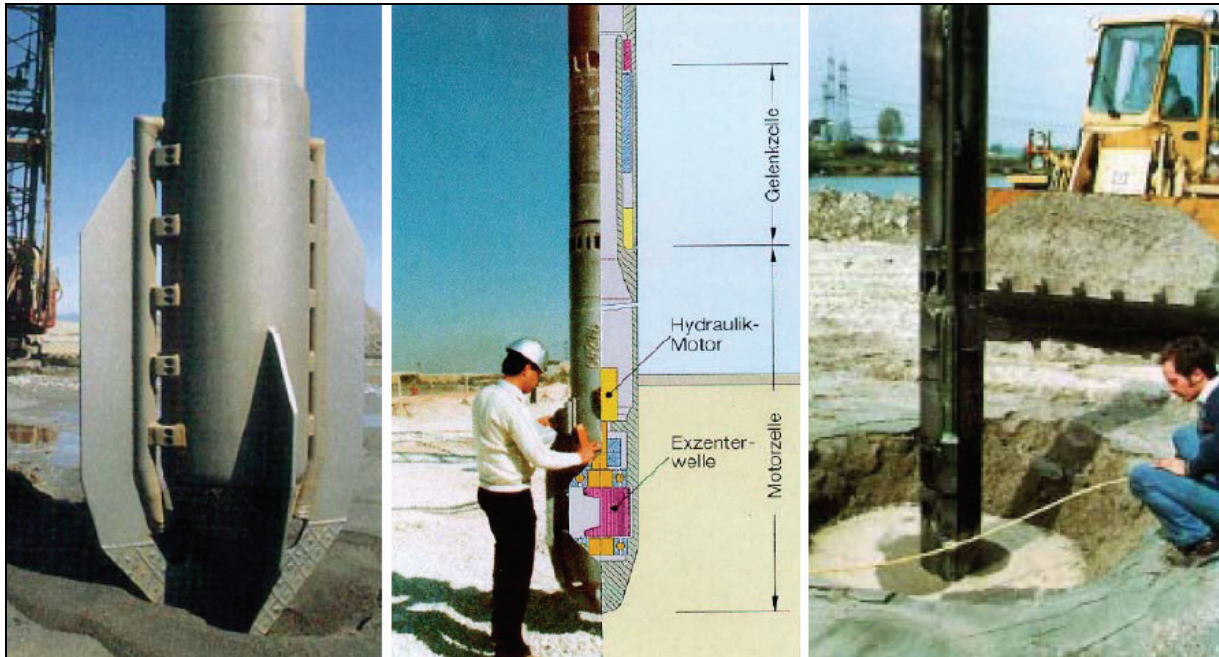


Abb. 4-5: Aufbau und Wirkungsweise (Trichterbildung an der Geländeoberfläche) eines Tiefenrüttlers

Die Antriebsleistung der Tiefenrüttler beträgt, je nach Erfordernissen, bis zu 225 kW. Die erzeugte Fliehkraft des Rüttlers kann Werte bis zu 350 kN erreichen. Der größte Verdichtungserfolg im Baugrund stellt sich dabei im Bereich der typischen Standortfrequenz (Eigenfrequenz) der jeweiligen Bodenformationen ein. Diese liegt etwa zwischen 25 und 30 Hz. Im Bereich der Resonanzfrequenz werden die initiierten Schwingungen maximal verstärkt. Die Rüttlerfrequenz kann daher stufenlos variiert werden; die Bodenantwort wird mit Sensoren an der Geländeoberfläche messtechnisch erfasst. In den Tiefenbereichen kann eine Lagerungsdichte von bis zu 80% erreicht werden, wobei ca. 8 bis 15% der Schichtmächtigkeit beim Kompaktionsvorgang als Setzung vorweg genommen werden [4], [20], [21], [47].



## **5 Entwicklungsziele für das Vibrationsverfahren beim HDD**

Erfahrungen aus der Praxis zeigen, dass die grabenlose Verlegung von Versorgungsleitungen mittels der HDD-Technik, besonders bei schwierigen Baugrundverhältnissen und großen Rohrdimensionen und Bohrungslängen, an Leistungsgrenzen stößt. Diese Tatsache geht nicht selten mit Schäden an den einzuziehenden Rohrleitungen einher. Das Spektrum der Bauschäden bzw. deren Ursachen reichen beispielsweise von instabilen Bohrlochzuständen, über Beschädigungen der Rohrumhüllung bis hin zum Festwerden oder zur Havarie des Rohrstranges. Im ungünstigsten Fall muss das HDD-Projekt komplett aufgegeben werden, was mit großen technischen Problemen und hohen wirtschaftlichen Verlusten verbunden ist. Häufig werden in diesem Fall alternative Bautechniken diskutiert, wie beispielsweise das Microtunneling oder die konventionelle, offene Grabenbauweise, um das angestrebte Projektziel doch noch zu erreichen.

Die gesteuerte Horizontalbohrtechnik, als ein relativ junges Verfahren zur grabenlosen Rohrverlegung, beinhaltet nach derzeitigem Kenntnisstand und basierend auf Praxiserfahrungen ein enormes Entwicklungs- und Optimierungspotential. Die im vorliegenden Forschungsprojekt untersuchte Möglichkeit, das Baurisiko beim HDD mittels der Einleitung gezielter Schwingungen in die einzuziehende Rohrleitung zu verringern, basiert auf den zuvor beschriebenen Zielvorgaben, wobei die Anwendung von Vibrationstechnologie in anderen bautechnischen Bereichen wertvolle Informationen hinsichtlich des Technologietransfers auf die gestellte Aufgabe liefert.

Orientiert an den formulierten Projektzielen, soll die gezielte Einleitung von Vibrationen einen Beitrag zur Erfüllung der nachstehenden Punkte leisten, die im Folgenden näher beschrieben werden:

- Minimierung des Baurisikos,
- Rohrdimensionen und Einziehlängen,
- Maschinentechnik, Dimensionierung des Bohrgerätes,
- Aspekte des Baugrunds,
- Wirtschaftlichkeit sowie
- Arbeitssicherheitliche Aspekte.

### **MINIMIERUNG DES BAURISIKOS**

Die Hauptintention beim Einsatz der Schwingungstechnik in Kombination mit dem Einziehvorgang einer Rohrleitung beim HDD ist es, die erforderliche Zugkraft, die vom Bohrergerät aufgewendet werden muss, effektiv zu reduzieren. Dies betrifft neben der Zugkraft, die beim konstanten Einziehvorgang erforderlich ist und im Idealfall linear zunimmt, auch diejenige Kraft, die vom Bohrergerät aufgebracht werden muss, um eine festgefahrene Rohrleitung zu lösen. D.h. es soll mittels des Vibrationsverfahrens die Möglichkeit geschaffen werden, die initiale Losbrechkraft herabzusetzen. Die Schwingungstechnologie liefert damit einen Beitrag zur Erhöhung der Zuverlässigkeit des HDD-Verfahrens bzw. des Rohreinziehvorgangs bei den jeweiligen projektspezifischen Anforderungen. Damit wird ein Beitrag zur Minimierung des Baurisikos geleistet.

### **ROHRDIMENSIONEN UND EINZIEHLÄNGEN**

Weltweit besteht eine zunehmende Nachfrage nach Bohrungen von mehr als 2 km Länge (ultra lange Bohrungen) und großen Rohrdimensionen ( $\varnothing > 1.500 \text{ mm}$ ). Verfahrensbedingt wächst mit zunehmender Einziehlänge und größerem Rohrdurchmesser die erforderliche Zugkraft an, so dass das Verhältnis von Rohrlänge und -durchmesser nur in gewissen Grenzen realisiert werden kann die Anwendung des HDD limitiert.

Der gezielte Einsatz von Vibrationen könnte einen Beitrag dazu leisten, in Zukunft größere Rohrlängen mit größeren Rohrdurchmessern bei HDD-Projekten zu realisieren.

### **MASCHINENTECHNIK (DIMENSIONIERUNG)**

Durch den Einsatz von Vibrationstechnologie könnte die Möglichkeit geschaffen werden, bei der Planung und Projektierung eines HDD-Vorhabens von vornherein die Leistung der Anlage geringer zu wählen, da die maximal zu erwartende Zugkraft beim Rohrinstallationsvorgang reduziert wird. Damit könnte gegebenenfalls auf die auf Erfahrungen beruhende gängige Praxis verzichtet werden, die Bohranlage auf die zwei- bis dreifache theoretisch errechnete Zugkraft überzudimensionieren, bzw. würden für einen unvorhersehbaren Zugkraftanstieg Leistungsreserven vorgehalten werden können.

### **WIRTSCHAFTLICHKEIT**

Die Projektierung eines HDD-Vorhabens sollte leistungsgerecht erfolgen. Aus wirtschaftlichen Gründen sollte eine maschinentechnische Über- oder Unterdimensionierung der Bohranlage vermieden werden. Die Bohranlagengröße, gemessen an der maximal aufbringbaren Zugkraft, bestimmt bei HDD-Projekten in entscheidender Weise die Kosten des

Gesamtvorhabens. Durch die Auswahl eines kleiner dimensionierten Bohrgerätes können - bei gleicher Verlegeleistung und bei vorgegebenen Rohrgeometrien und geophysikalischen Vorgaben - Kosten eingespart werden.

### **ASPEKTE DES BAUGRUNDS**

Eines der wichtigsten Kriterien für den Erfolg oder Misserfolg eines HDD-Projektes stellt die Beschaffenheit des Baugrundes dar. Ein stabiler Bohrlochzustand bildet eine notwendige Voraussetzung für das erfolgreiche Einziehen der Produktrohrtour. Nicht selten ereignen sich (partielle) Bohrlochzusammenbrüche, die, infolge der erhöhten Reibwerte, zu einem deutlichen Anstieg der Einziehkraft bis hin zum Festwerden der Rohrleitung führen. Als schwer beherrschbar beim HDD gelten vor allem rollige Formationen mit wenig bindigen Bodenbestandteilen.

Vor allem in diesen kritischen Bereichen soll mittels Vibrationen versucht werden, die wirkende Reibung zwischen Rohrmanteloberfläche und umgebendem Bodenmaterial zu reduzieren. Im Bereich der Rohroberfläche soll im unmittelbaren Nahbereich des Rohres ein Verflüssigungszustand des umgebenden Bodenmaterials erreicht werden, der infolge dessen wie ein Gleitfilm wirkt und somit zu einer Reduzierung der Zugkräfte beiträgt. Gleiches gilt für bindigen Boden wie Schluff und Ton; die initiierten Schwingungen bewirken eine Freisetzung des im Material gebundenen Wassers, wodurch sowohl die Haft- als auch die Gleitreibungswerte herabgesetzt werden. Bei der Verwendung von thixotropen Bohrspülungen resultiert aus den eingebrachten Schwingungen ein Aufrechterhalten der flüssigen Sol-Phase, beispielsweise bei Stillstand des Spülungskreislaufs.

### **ARBEITSSICHERHEITLICHE ASPEKTE**

Im Falle des Festwerdens oder einer Havarie der Rohrleitung werden unterschiedliche technische Mittel eingesetzt, um die Rohrleitung wieder aus dem Bohrloch zu lösen. Eine häufig praktizierte Methode ist der Einsatz von Bergekränen oder schweren Planierraupen, die mittels Zugeinrichtungen (z.B. Stahlseilen) vor das freie Ende der Rohrleitung gespannt werden, um die Leitung zurückzuziehen. Derartige Vorgänge werden häufig unter Vernachlässigung arbeitssicherheitlicher Aspekte durchgeführt, insbesondere durch die Verwendung ungeeigneter Anschlag- und Zugvorrichtungen sowie bei Rettungsversuchen in schwierigem Terrain.

Durch die Möglichkeit, eine festgefahrene Rohrtour durch Vibrationen zu lösen, würden derartige Vorgänge, mitsamt deren sicherheitlichen Defiziten, gänzlich entfallen. Damit wird ein Beitrag zur Arbeitssicherheit auf HDD-Baustellen geleistet.

## 6 Pilotversuche (Kurzrepetition)

In einer ersten Untersuchungsphase wurden mittels einer kleinmaßstäblichen Versuchsanlage Vorversuche durchgeführt. Darin sollten, orientiert an der beschriebenen Praxisproblematik, die erdachten theoretischen Ansätze, resultierend u.a. auch aus anderweitig bekannten und in der Technik im Einsatz befindlichen Schwingungsapplikationen sowie Kenntnissen zum bodenphysikalischen Verhalten von Böden unter dem Einfluss von Erschütterungen/Schwingungen, dahingehend übergeprüft werden, ob es mittels der Einleitung gezielter Vibrationen grundsätzlich möglich ist, eine wirksame und effektive Reduzierung der erforderlichen Einziehungskraft herbeizuführen. Die Arbeiten im Rahmen dieser, als Pilotprojektphase zu bezeichnenden Studie, wiesen somit einen mehr oder weniger rein qualitativen Charakter auf, in der die prinzipielle Wirksamkeit des ‚Vibrationsverfahrens‘ beim Installationsvorgang einer Rohrleitung belegt werden sollte.

Am Lehrstuhl für Tagebau und Internationaler Bergbau des Instituts für Bergbau wurde zu diesem Zweck ein Pilotversuchsstand für die Untersuchung der Mantelreibung von Rohren bei der grabenlosen Rohrverlegung konstruiert. Über eine elektrische Motorwinde wurden die Versuchsrohre (Stahlrohr,  $d_a=42\text{mm}$ ; PE-ummanteltes Rohr,  $d_a=38\text{mm}$ ) durch das eingebaute Bodenmaterial (Sand und Ton) gezogen. Während des Einziehvorganges wurde die erforderliche Zugkraft über eine Kraftmessdose erfasst. Die Versuchsrohre wurden über einen, am heckseitigen freien Rohrende aufmontierten, pneumatisch betriebenen Außenvibrator in Schwingung versetzt (Netter Turbinenvibrator Typ NCT 10). Die Vibrationseinleitung erfolgte quer zur Zugrichtung. Alle Messgrößen wurden EDV-technisch erfasst.

Nachstehende Abbildungen zeigen den Aufbau der Pilotversuchseinrichtung (Abb. 6-1) sowie den verwendeten pneumatischen Turbinenvibrator auf dem freien Rohrende (Abb. 6-2).

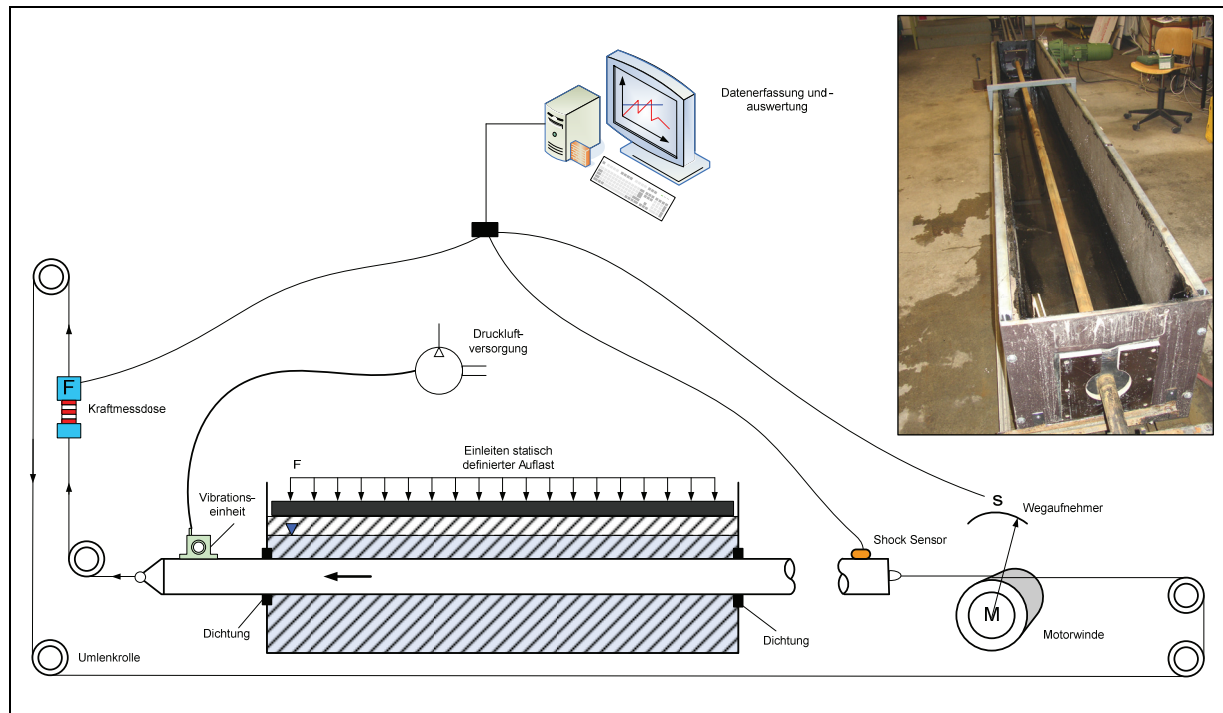


Abb. 6-1: Aufbau der Pilotversuchsanlage

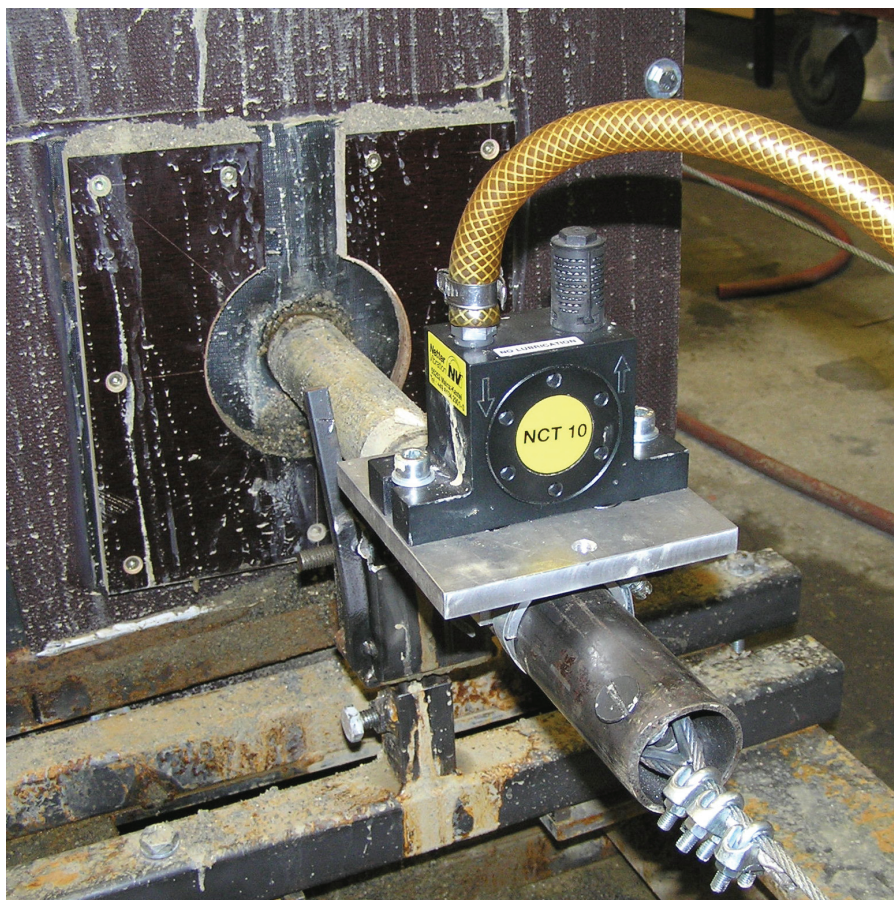


Abb. 6-2: Quer zur Zugrichtung heckseitig auf dem Rohr installierter Turbinenvibrator

Zur Beurteilung der Reibungsverhältnisse bei unterschiedlichen Randbedingungen wurde ein Testprogramm statuiert. Zwischen den einzelnen Versuchsreihen wurden verschiedene Einflussparameter variiert und hinsichtlich der zum Einziehen notwendigen Zugkraft beurteilt.

Die Untersuchungsergebnisse aus den Pilotversuchen bestätigten generell den theoretischen Ansatz, wonach durch die Initiierung von Vibrationen in das einzuziehende Rohr eine deutliche Reduzierung der Haft- und Gleitreibungswerte und infolge dessen eine Verringerung der erforderlichen Einziehkraft (sowohl Losbrech- als auch Gleitkraft) erreicht werden konnte. Die Messungen lieferten bei der Einleitung von Schwingungen reduzierte Zugkraftwerte in der Größenordnung  $> 50\%$  im kohäsionsarmen Material (Sandboden) bzw.  $> 60\%$  im kohäsiven Tonboden. Im letzteren Fall bewirkten die Schwingungen eine partielle Fluidisierung des den Rohrmantel umgebenden Tonmaterials, wobei die sich ausbildende Flüssigkeitszone als Gleitschicht wirkte. Im Sandboden trat ferner der als positiv zu bewertende Nebeneffekt auf, dass der Einziehvorgang mit Schwingungseinleitung gleichmäßiger, d.h. ruckfreier von Statten geht (keine Slipstick-Effekte).

Die nachstehenden Abbildungen zeigen exemplarisch einige ausgewählte Ergebnisse der Pilotuntersuchungen.

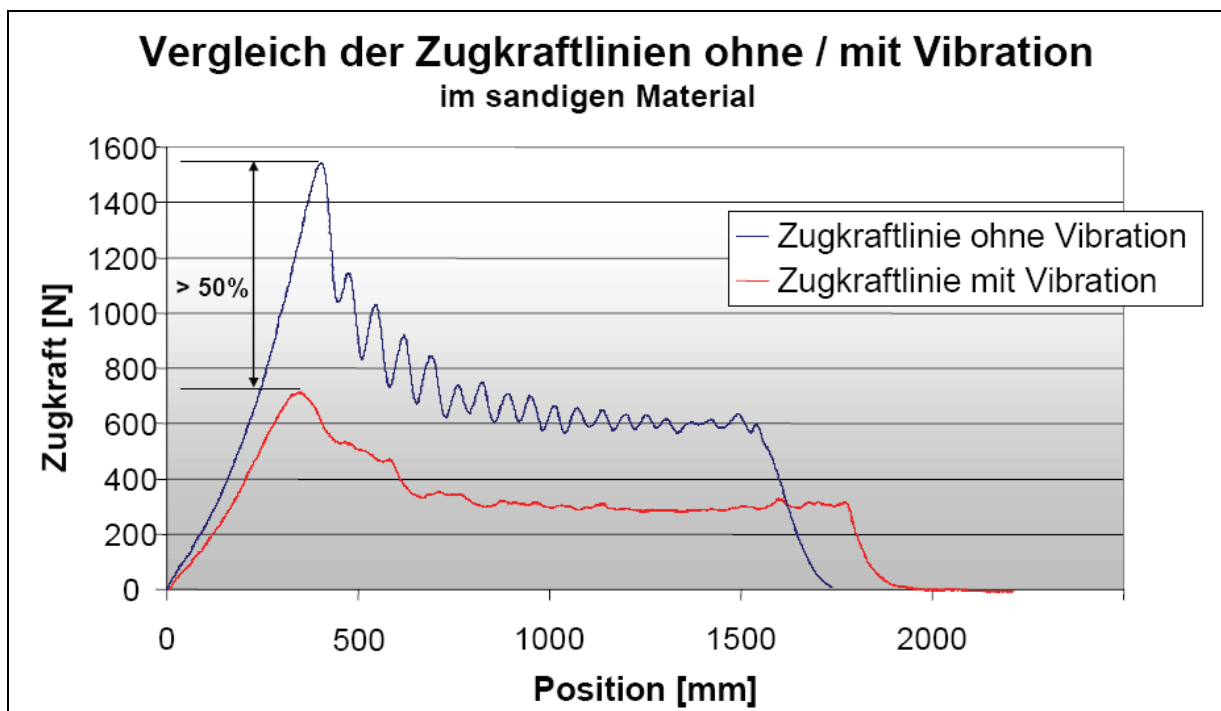


Abb. 6-3: Vergleich der Losbrechkraftlinien mit und ohne Vibrationseinleitung im Pilotversuch

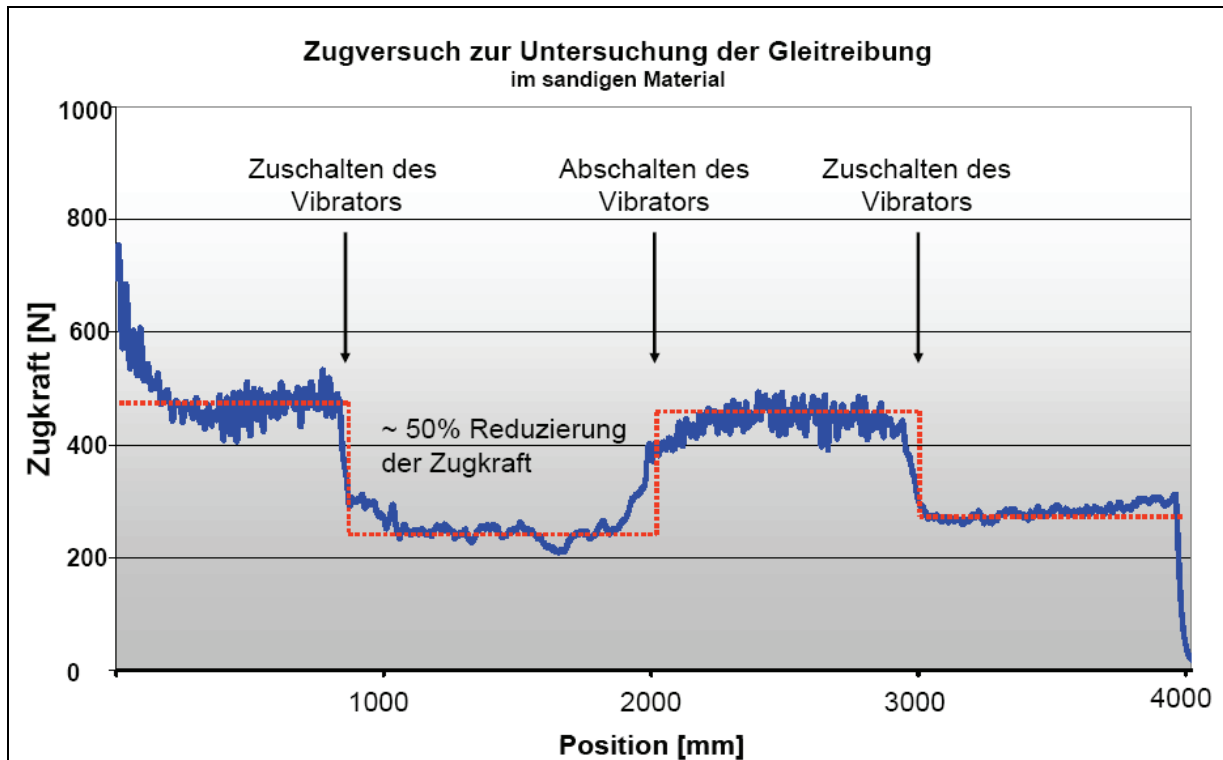


Abb. 6-4: Zugkraftkurve bei intervallmäßigem Initiieren von Schwingungen (Gleitkraft)

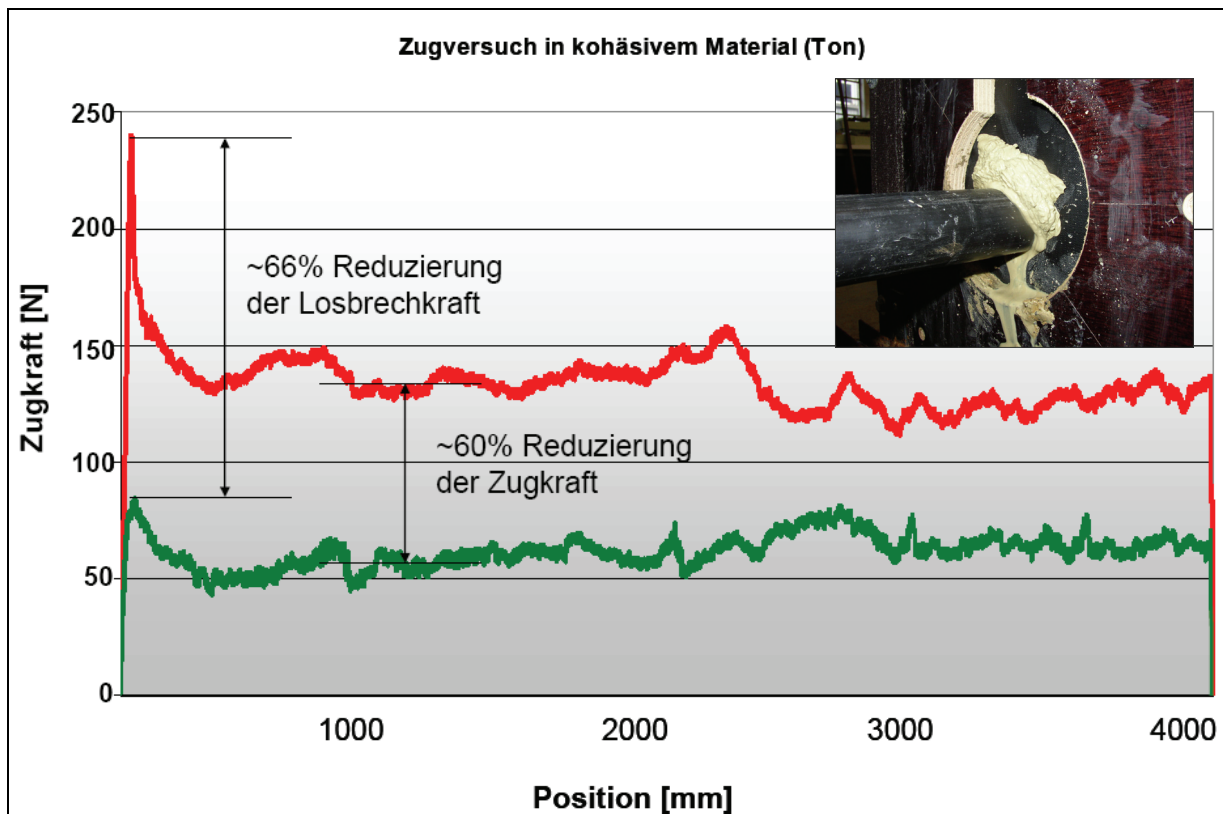


Abb. 6-5: Zugkraftkennlinie und Vibrationseffekte im Tonboden (Verflüssigungserscheinungen)

Die Ergebnisse aus der ersten Projektphase lieferten lediglich qualitative Aussagen zur Effektivität des Einflusses von Schwingungen auf den Einziehvorgang von Rohrleitungen bzw. die erforderlichen Zugkräfte. Die sich anschließende zweite Untersuchungsphase sollte weitere konkrete Erkenntnisse im Hinblick auf die Quantität des erforderlichen Schwingungseintrags liefern.



## 7 Versuchsprogramm

### 7.1 Offene Fragen

Die positiven Ergebnisse aus der ersten Pilotprojektphase haben Anlass gegeben, aufbauend auf diesen Erkenntnissen, die Forschungsarbeiten in einer zweiten Phase fortzuführen. Vorrangiges Ziel dabei war die Quantifizierung der auf den Einziehvorgang einer Rohrleitung Einfluss nehmenden Parameter, insbesondere unter Berücksichtigung der eingeleiteten Vibrationen. Die Basis der weiteren Forschungsarbeiten bildeten wiederum Technikumsversuche. Zu diesem Zweck wurde am Lehrstuhl für Tagebau und Internationaler Bergbau eine neue Versuchsanlage in einem realitätsnäheren Maßstab konzipiert, mit dem die Mantelreibungsverhältnisse durch Erfassung der Einziehkraft unter verschiedenen Randbedingungen untersucht werden können.

Die im Rahmen der Forschungsarbeit formulierten Zielsetzungen, basierend auf theoretischen Betrachtungen, orientierten sich an den nachstehenden Fragestellungen:

1. Welche Schwingungsenergien bzw. -intensitäten sind notwendig für eine In-Situ-Anwendung?
2. Wie wirkt sich der Vibrationseintrag bei unterschiedlichen Rohrdurchmessern und mit zunehmender Einziehlänge aus?
3. Welchen Einfluss nehmen initiierte Schwingungen auf die Materialeigenschaften einer Rohrtour? Haben Vibrationen Einfluss auf die Materialfestigkeit eines Rohrstranges?
4. Was bewirken die über die Rohrleitung eingebrachten Schwingungen im umgebenden Gebirge / Boden?
5. Wo im Rohrstrang muss ein Schwingungserreger platziert werden, um eine maximale Effektivität des Verfahrens zu gewährleisten?
6. Was bewirken Vibrationen bei der Verwendung von Bohrspülung wie beispielsweise Bentonit-Wasser-Suspensionen?
7. Wie kann eine Schwingungsapparatur technisch und konstruktiv für einen großmaßstäblichen Einsatz gestaltet werden?

## 7.2 Formulierung von Ziel- und Einflussgrößen

Die systematische Analyse der auf den Einziehvorgang Einfluss nehmenden Parameter orientiert sich an der Festlegung fixer und variabler Versuchsparameter. Zur Charakterisierung des Einzieherfolges wurden zunächst die Ziel- und Einflussgrößen formuliert. Anhand der Technikumsversuche wurde der Zusammenhang zwischen diesen im Folgenden dargestellten Größen systematisch untersucht.

### ZIELGRÖSSE

**Zugkraft beim Einziehvorgang** - Gemäß der formulierten Zielsetzung des Projektes sollte anhand der Technikumsversuche geklärt werden, welchen Einfluss verschiedene Parameter auf die erforderliche Zugkraft beim Einziehen der Rohrleitung, im Sinne der (beabsichtigten) Zugkraftreduzierung, nehmen.

### EINFLUSSGRÖSSEN

- Intensität der Schwingungen
- Einziehgeschwindigkeit
- Rohrgeometrie
- Rohrmantelmaterial
- Bodeneigenschaften

Die genannten Parameter nehmen direkten Einfluss auf die Reibungsverhältnisse der Rohroberfläche gegenüber der Bohrlochwandung und damit auf die erforderliche Zugkraft beim Einziehen der Rohrleitung.

Die Intensität der initiierten Schwingungen wird über die Drehzahl (Frequenz) des Vibrationsaggregates variiert. Die Schwingungsfrequenz steht in direkter Beziehung zur Schwingungsamplitude: mit zunehmender Schwingungsfrequenz nimmt die maximale Auslenkung des Systems (Amplitude) ab und umgekehrt.

Gemäß praktischen Erfahrungen beim HDD bzw. dem Einziehvorgang der Rohrleitung geht mit einer Verringerung der Einziehgeschwindigkeit eine Abnahme der Zugkraft einher. Neben der Schwingungsenergie stellt daher die Einziehgeschwindigkeit eine weitere variable Größe dar, die im Rahmen der Versuchsreihen berücksichtigt wurde. Mit der Versuchsanlage konnten zwei konstante Geschwindigkeitsstufen realisiert werden, nämlich 1 m/min und 0,5 m/min.

Im Hinblick auf die Realisierung eines HDD-Projektes wurden die übrigen Einflussgrößen innerhalb der einzelnen Versuchsreihen als statisch betrachtet. Die Rohrgeometrie, d.h. der

Rohraußendurchmesser sowie die Oberflächenbeschaffenheit (Stahl oder PE-Ummantelung), nehmen direkten Einfluss auf die Reibungsverhältnisse während des Einziehvorgangs (auch ohne Schwingungseintrag). In der Regel weisen die in der Praxis nahezu ausschließlich verwendeten außenbeschichteten bzw. mit Kunststoff (PE) ummantelten Rohre geringere Reibwerte auf als blanke Stahlrohre.

Besonders bezüglich der Schwingungsapplikation kommt dem beim HDD zu durchörternden Boden, insbesondere im Hinblick auf seine Verflüssigungsneigung, Formstabilität und Tragfähigkeit, eine große Bedeutung zu. Im Rahmen der Forschungsarbeiten wurden Zugversuche in einem sandigen und bindigen Material durchgeführt (Sand- und Schluffboden).

### **7.3 Verwendete Modellböden**

Im Rahmen der Technikumsversuche wurden zwei unterschiedliche Bodenmaterialien verwendet, die typischer Weise beim HDD durchörtert werden: zum einen kohäsionsloser Sandboden der Körnung 0/1 und zum anderen bindiger Schluffboden.

#### **SANDBODEN**

Bei dem verwendeten Sandboden handelt es sich um Quarzsand, der gemäß der in Abb. 7-1 dargestellten Kornverteilungskurve als Mittelsand mit Fein- und Grobanteilen (mS, fs, gs) zu klassifizieren ist. Eine Siebanalyse wurde sowohl für trockenen als auch nassen Sand durchgeführt.

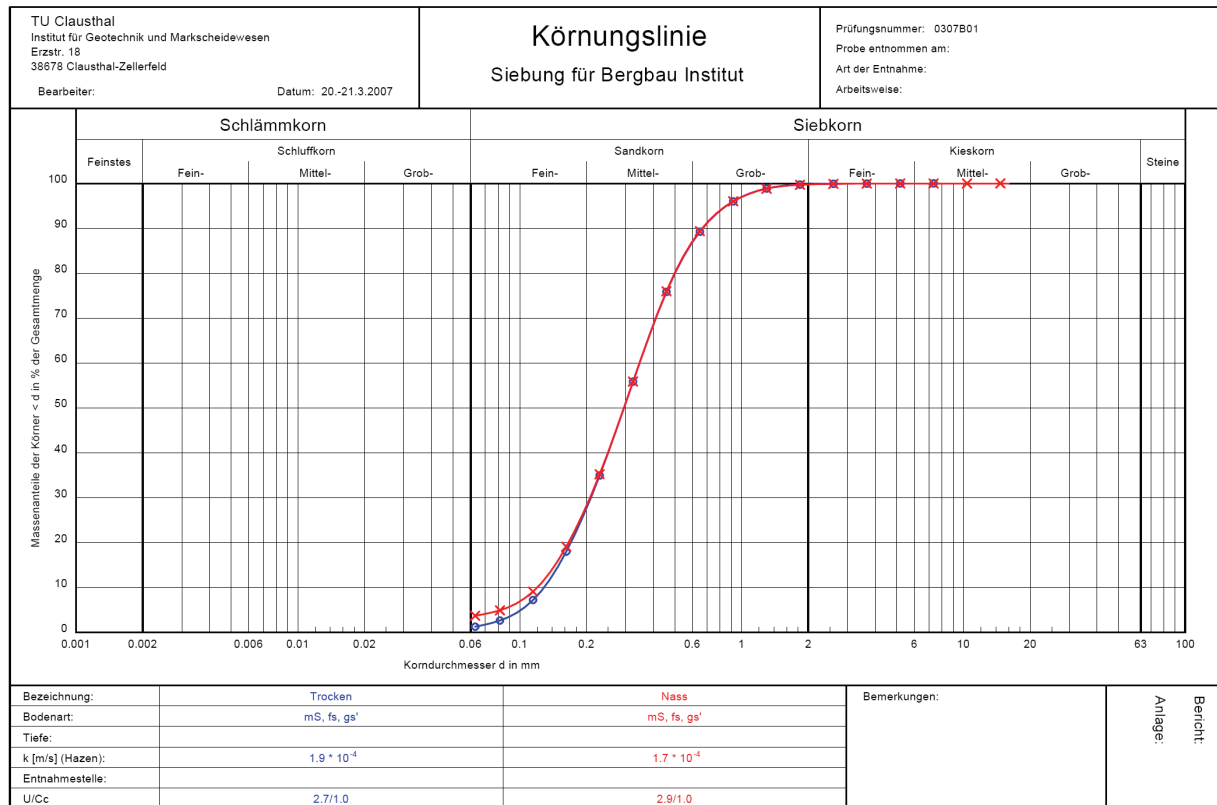


Abb. 7-1: Körnungslinie des verwendeten Modellsandes

Für den Sand wurde eine Ungleichförmigkeitszahl von  $U = 2,7$  (trocken) bzw.  $2,9$  (nass) ermittelt, die Krümmungszahl betrug jeweils  $C = 1,0$ . Der Durchlässigkeitsbeiwert  $k$  wurde zu  $1,9 \times 10^{-4}$  m/s bzw.  $1,7 \times 10^{-4}$  m/s bestimmt. Weitere bodenmechanische Parameter sind in nachstehender Tab. 7-1 zusammengestellt.

Tab. 7-1: Bodenmechanische Parameter des verwendeten Modellsandes

Trockendichte		Porenanteil		Porenzahl		Reibungswinkel	
$\rho_{d, \max}$	$\rho_{d, \min}$	$n_{\max}$	$n_{\min}$	$e_{\max}$	$e_{\min}$	$\varphi_{\max}$	$\varphi_{\min}$
[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[-]	[-]	[-]	[-]	[°]	[°]
1,81	1,50	0,45	0,30	0,76	0,46	38	33

## SCHLUFFBODEN

Der für die Versuche verwendete schluffige Modellboden wurde aus einem ehemaligen Kiestagebau im Harzvorland beschafft. Das Material zeigt deutliche tonige Bestandteile und kann in den Bereich Mittelschluff eingeordnet werden. Damit liegt das Material im Grenzbereich des Verflüssigungspotenzial.

#### 7.4 Verwendete Versuchsrohre

Für die Durchführung der Zugversuche wurden vier Rohre in unterschiedlichen geometrischen Dimensionen untersucht, die üblicherweise beim HDD verwendet werden.

Bei den verwendeten Rohren handelt es sich um zertifizierte, maschinell HFW-HFI-längsnahtgeschweißte Stahlleitungsrohre gemäß EN 10220, EN 10208-2 und EN 1594. Die Rohre sind in Tab. 7-2 mit ihren geometrischen und materialtechnischen Kenndaten aufgeführt.

Tab. 7-2: Kennwerte der Versuchsrohre

Rohrtyp	Dimension	Länge	Werkstoff	Streckgrenze	Metergewicht
Stahlrohr DN100, unbeschichtet	114,3 x 3,6 mm	12,00 m	L290NB	290 N/mm <sup>2</sup>	9,83
Stahlrohr DN100, PE-beschichtet	114,3 x 3,6 mm	12,00 m	L290NB	290 N/mm <sup>2</sup>	10,01
Stahlrohr DN150, PE-beschichtet	168,3 x 6,3 mm	16,00 m	L360MB	360 N/mm <sup>2</sup>	25,17
Stahlrohr DN200, PE-beschichtet	219,1 x 5,0 mm	12,00 m	L360NB	360 N/mm <sup>2</sup>	33,06

Zur Integration der Rohre in die Versuchsanlage und aufgrund des beschränkten Platzangebots in der Werkstatthalle wurden die Rohre jeweils auf eine Länge von 11,5 m eingekürzt.

Zur Untersuchung des Einflusses der Rohrmanteloberfläche (Stahl - PE) auf die erforderliche Einziehkraft wurden ausschließlich die beiden DN100 Rohre verwendet. Die nachfolgenden Versuche mit den größeren Rohren konzentrierten sich, in Anlehnung an die Tatsache, dass in der Praxis nahezu ausschließlich PE-ummantelte Stahlrohre Verwendung finden, auf diese Rohrtypen.

#### 7.5 Parametervariation bei der Versuchsdurchführung

Die Durchführung der Zugversuche erfolgte unter mehreren Prämissen. Vorrangiges Ziel war dabei die Ermittlung der Abhängigkeit der Zugkraft von der eingeleiteten Schwingungsenergie, d.h. unter dem Einfluss von Vibrationen sollte eine Reduzierung der Einziehkraft erreicht und dabei die jeweiligen Messgrößen quantitativ erfasst werden. Zu

---

diesem Zweck wurden sukzessive verschiedene, auf die Zugkraft Einfluss nehmende Randparameter variiert und systematisch, dem zuvor festgelegten Schema einer Versuchsmatrix folgend, Zugversuche durchgeführt.

Orientiert an der Aufgabenstellung wurden die nachstehend beschriebenen Einflussgrößen in verschiedenen Messreihen untersucht.

- **VIBRATORLEISTUNG.** Im Rahmen der Technikumsversuche wurden im Wesentlichen zwei unterschiedliche Vibrationsaggregate verwendet. Die selbstgebaute pneumatische Vibrationseinheit, die im hohen Drehzahlbereich eine Fliehkraft von ca. 3,2 kN erreicht, wurde für die ersten Versuche mit den DN100 Rohren verwendet. Da sich herausstellte, dass die Leistung dieser Einheit insbesondere für die größeren Rohre nicht ausreichte, um eine markante Zugkraftreduzierung herbeizuführen, wurde im Folgenden die elektrisch betriebene Betonrüttelflasche verwendet, die eine Fliehkraft von maximal 8,5 kN entwickelt.
- **VIBRATIONSFREQUENZ.** Zur Ermittlung des Einflusses der Vibrationsfrequenz auf die erforderliche Zugkraft wurden die verwendeten Vibrationsaggregate innerhalb der entsprechenden Versuchsreihen mit unterschiedlichen Drehzahlen betrieben. Mit zunehmender Drehzahl gehen eine proportionale Abnahme der Schwingungsamplitude und eine Erhöhung des Energieeintrags einher. Die Versuche wurden jeweils mit Vibrationsfrequenzen von 0, 80, 100, 150 und 200 Hz durchgeführt.
- **AUFLAST.** In Abhängigkeit der mittels der pneumatischen Hebekissen aufgebraachten statischen Last, wurde sukzessive der Einfluss der äußeren Bodenbeanspruchung (Konsolidierungszustand des Bodens) untersucht. Hierdurch wurden bestimmte Bodenüberdeckungen und deren Einfluss auf die Einziehkraft, in Abhängigkeit des Vibrationseintrags, simuliert. Die Versuchsdurchführung erfolgte vorwiegend unter Auflasten von 200 und 400 kN/m<sup>2</sup> (entspr. ca. 15 bzw. 25 m Bodenüberdeckung).
- **EINZIEHGESCHWINDIGKEIT.** Die Reduzierung der Einziehgeschwindigkeit stellt gemäß praktischen Erfahrungen beim HDD ein gängiges Mittel dar, um einem (plötzlichen) Anstieg der Einziehkraft entgegenzuwirken. Demzufolge wurden ausgewählte Zugversuche unter Variation der Einziehgeschwindigkeit (0,5 m/min und 1 m/min) vorgenommen.
- **ROHRGEOMETRIE.** Zur Ermittlung des Einflusses der Rohrgeometrie, d.h. des Rohrdurchmessers und damit der Rohrmanteloberfläche (Reibfläche), wurden zur Ermittlung des erforderlichen Schwingungseintrags verschiedene Rohre mit unterschiedlichen Dimensionen untersucht (DN100, DN150, DN200, jeweils PE-ummantelte Stahlrohre).

- **ROHRMANTELOBERFLÄCHE.** Die Untersuchung zum Einfluss der Rohrmanteloberfläche und der damit verbundenen Gleiteigenschaften infolge Reibung wurden anhand des DN100 Stahlrohres und des DN100 PE-beschichteten Stahlrohres ermittelt.
- **BODENMATERIAL.** Zur Untersuchung des Einflusses der Reibungsverhältnisse bzw. des Schwingungseintrags in unterschiedlichen Baugrundmaterialien wurden ausgewählte Versuche mit dem DN200 PE-ummantelten Stahlrohr in einem kohäsiven Schluffboden durchgeführt und den Ergebnissen des gleichen Rohres im sandigen Material vergleichend gegenübergestellt.

Eine wichtige und notwendige Voraussetzung bei der Versuchsdurchführung war die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse. Dies erforderte die strikte Einhaltung konstanter Mess- und Randbedingungen innerhalb der jeweiligen Versuchsreihen. Um zuverlässige und aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, wurden die einzelnen Zugversuche mindestens fünf Mal, jeweils unter Beibehaltung der entsprechenden Randbedingungen, vorgenommen und aus den Ergebnissen repräsentative Mittelwerte errechnet. Die Datenaufbereitung, -auswertung und grafische Darstellung erfolgte EDV-gestützt.

Vor Aufnahme des eigentlichen Versuchsbetriebs wurde jeweils eine Reihe von Probeversuchen vorgenommen, bis sich reproduzierbare Messwerte einstellten. Da diese Ergebnisse, zumeist unmittelbar nach dem Umbau der Versuchsanlage, teilweise stark differierten und sich der Einfluss der Schwingungseinleitung nicht signifikant auswirkte, kristallisierte sich eine allgemeine Vorgehensweise bei der Versuchsdurchführung heraus, die den Ablauf der Versuchsserien im Folgenden bestimmte.

Hauptsächlich zeigte sich, dass den bodenmechanischen Eigenschaften des verwendeten Baugrundmaterials, insbesondere der Lagerungsdichte, eine entscheidende Bedeutung zukommt. Um während der laufenden Zugversuche eine spätere Konsolidierung und somit eine Änderung der Lagerungsdichte des Bodens zu vermeiden, wurde beim Einbau darauf geachtet, dass eine maximale Verdichtung des Materials innerhalb des Materialkastens gegeben war. Dies wurde zusätzlich durch die Initiierung von Schwingungen und unter der Einleitung einer statischen Auflast erreicht.

Da die Scherfestigkeit von Lockergesteinen u.a. vom Konsolidierungszustand des Materials abhängt, zeigte sich im Verlauf der Vorversuche, dass in Abhängigkeit des verwendeten Bodens bestimmte Mindestruhezeiten zwischen den einzelnen Versuchen eingehalten werden müssen. Für das untersuchte Sandmaterial ergab sich, dass kurze Ruhezeiten von ca. 15 bis 30 Minuten nicht ausreichend waren, um messbare Zugkraftreduzierungen durch den Schwingungseintrag herbeizuführen. Da davon ausgegangen wurde, dass die Primärsetzung des Sandbodens nach dieser Zeit noch nicht vollständig abgeklungen ist, wurden die Ruhepausen zwischen den Einzelversuchen auf zwei Stunden ausgedehnt. Im Falle des

verwendeten Schluffbodens ergaben sich erst nach einer Ruhezeit von ca. 12 Stunden reproduzierbare und repräsentative Messergebnisse. Beim Verlauf und Betrag der Zeitsetzung musste ferner die Aufbringung der statischen Auflast berücksichtigt werden. Da das Zeitsetzungsverhalten von der aufgetragenen Spannung abhängt, führt eine Spannungserhöhung zunächst zu einer weiteren Setzung des Materials, wird die Spannung abgebaut, liegt ein Überkonsolidierungszustand vor, der ebenfalls durch die Einleitung von Schwingungen abgebaut wurde.

Des Weiteren musste eine vollständige Wassersättigung des Bodenmaterials gewährleistet werden, um über den sich infolge der Schwingungen einstellenden Porenwasserdruck eine Teilverflüssigung und damit eine Zugkraftreduzierung zu bewirken.

Sofern nicht anders angegeben, wurden, primär aus Gründen der Datenreduzierung, alle Zugversuche mit einer Einziehgeschwindigkeit von 1 m/min durchgeführt.

Bei der Erfassung der auftretenden Zugkräfte wurde jeweils unterschieden zwischen der initialen Losbrechkraft, die infolge der Überwindung der Haftreibung beim Anziehen des Versuchsrohres auftritt, und der sog. Gleitkraft, die während des konstanten Einziehvorgangs wirkt.

Unter Beachtung der o.g. Versuchsvorgaben konnte eine hohe Reproduzierbarkeitsrate erreicht werden.



## **8 Aufbau und Beschreibung der Versuchsanlage**

Im Folgenden werden die wesentlichen Komponenten der Versuchsanlage und deren Funktion beschrieben. Den Konstruktionsarbeiten an der Anlage ist eine rechnerische Dimensionierung unter Berücksichtigung der geometrischen und bodenphysikalischen Randbedingungen, insbesondere hinsichtlich der zu erwartenden Reibungs- bzw. Zugkräfte, vorangegangen.

### **8.1 Grundträger- und Materialkastenkonstruktion**

Die Grundträgerkonstruktion der Versuchsanlage besteht aus zwei parallelen Doppel-T-Schienen einer Länge von jeweils 24 m, die mittels Stahllankern im Boden der Werkstatthalle befestigt wurden. Die darauf montierte Kastenkonstruktion, durch die die Versuchsrohre axial geführt werden und die der Aufnahme des Bodenmaterials dient, wurde aus verstärkten Stahlblechen konstruiert und gegen Wasseraustritt abgedichtet. Der Materialkasten ruht auf gummierten Dämpferelementen, um die eingeleiteten Schwingungen nicht auf das Grundgerüst zu übertragen. Der Mittelteil des Kastens misst 5.000 mm, die Breite und Höhe beträgt 750 mm. Für die kopf- und heckseitige Rohrdurchführung wurden Flanschkonstruktionen gefertigt, die mit Dichtungen in Form von gewebeverstärktem Plattengummi (Förderbandgurte) versehen sind. Ferner wurde auf beiden Seiten je eine Vorkammer mit Dichtungen und zusätzlichen Stützrollen für das Versuchsrohr vorgesehen.



Abb. 8-1: Aufbau der Versuchsanlage

An den Kopfenden des Grundträgers wurden Umlenkrollen mit Lagerböcken zur Führung des umlaufenden Zugseils angebracht, welches zentrisch am Rohrquerschnitt angeschlagen ist. Heckseitig befindet sich eine Seilspannvorrichtung.

Zur Simulation eines Insitu-Überlagerungsdrucks (Gebirgsdruck) wurden auf das im Kasten befindliche Bodenmaterial biegesteife Bleche aufgelegt und mittels fünf pneumatischer Hebekissen, die unter dem oberen Rand des Materialkastens verspannt wurden (Widerlager), ein definierter Druck aufgegeben. Über Drehventile kann die Auflastspannung variabel eingestellt werden.

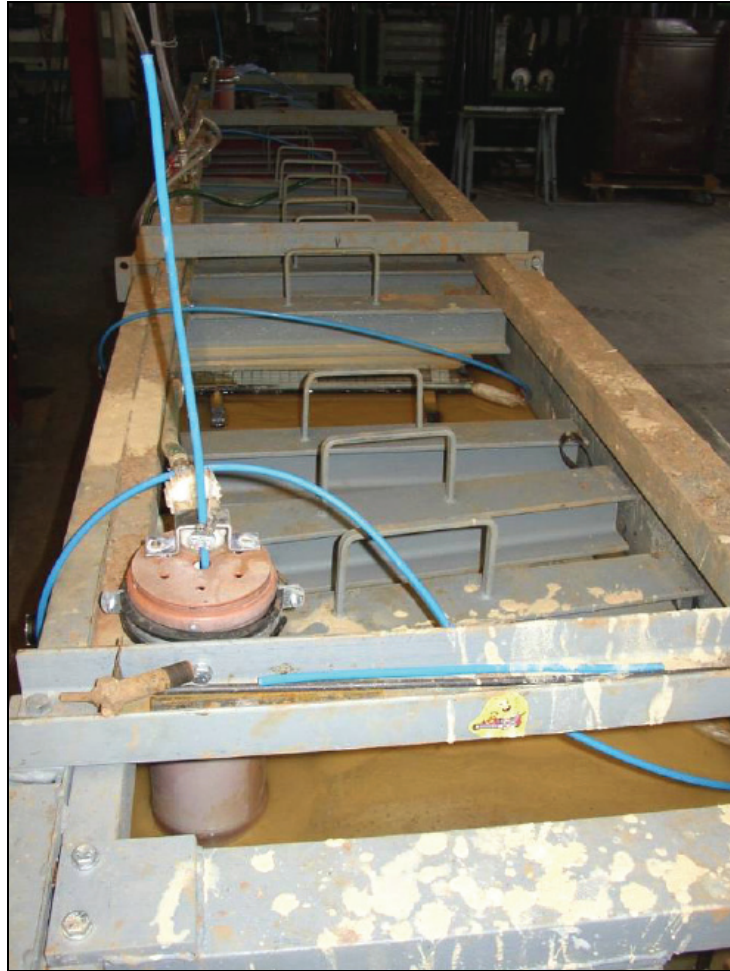


Abb. 8-2: Pneumatische Hebekissen zur Simulation des Insitu-Überlagerungsdrucks

Da die durchgeführten Versuche im Hinblick auf realitätsnahe Bedingungen unter vollständiger Wassersättigung des Bodenmaterials durchgeführt wurden, wurden zur Kontrolle des Wasserstandes zwei perforierte Pegelrohre eingebaut. Mittels Schwimmschaltern kann der Wasserstand auf einem konstanten Niveau gehalten werden.

Um eine Rotation des Rohres und ein Durchhängen der freien Rohrenden zu verhindern, wurde eine Führungskonstruktion in Form von Rollenböcken/Rollenwagen angebracht; die Führungs- bzw. Stützrollen laufen auf den Grundträgern.

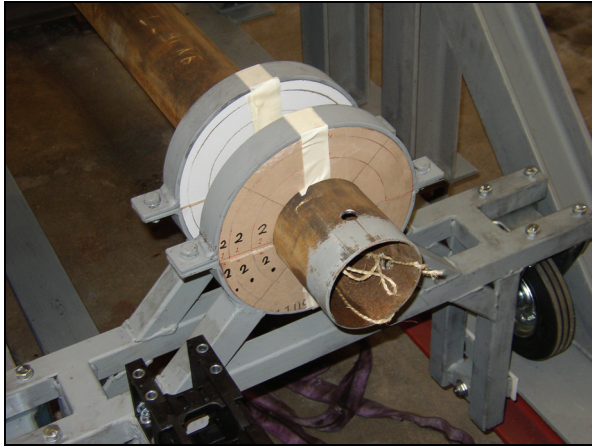


Abb. 8-3: Rollenbock zur Aufnahme der Rohrenden



Abb. 8-4: Heckseitige Rohrführung mit Einrichtungen zur Hydraulikversorgung und Messtechnik

### 8.2 Einziehvorrichtung

Das Einziehen der Versuchsrohre erfolgt über eine Seilzugvorrichtung. Die erforderliche Antriebskraft zum Verfahren der Rohre wird über einen polumschaltbaren Drehstrommotor (0,55 kW, 400 V, 50 Hz, 1.400 Upm) erreicht. Über einen Frequenzumrichter FU (1,5 kW, 1,2 A, Netzspannung 3 x 380 bis 480 V, Ausgangsspannung 3 x 400 V, Ausgangsfrequenz 0,5 bis 120 Hz) kann die Drehzahl des Motors eingestellt werden ( $1.400$  und  $2.800 \text{ min}^{-1}$ ).

Ein Stirnradgetriebe dient der Anpassung der Motordrehzahl auf die nachzubildende Einziehgeschwindigkeit der Versuchsrohre sowie der Anpassung des Drehmoments. Eine gummigedämpfte Klauenkupplung (Hadeflex-Kupplung) überträgt die Antriebskraft auf die Spilltrommel. Die Seiltrommel zum Antrieb des Zugseils besitzt einen Radius von 120 mm. Durch eine eingefräste Wendel kann das Zugseil in mehreren Wicklungen nebeneinander aufgelegt werden. Die Übertragung der Antriebskraft erfolgt somit reibschlüssig. Durch den Durchmesser der Spilltrommel können gemäß der beiden Hauptdrehzahlbereiche des Antriebsmotors Einziehgeschwindigkeiten von 0,5 m/min und 1 m/min realisiert werden.



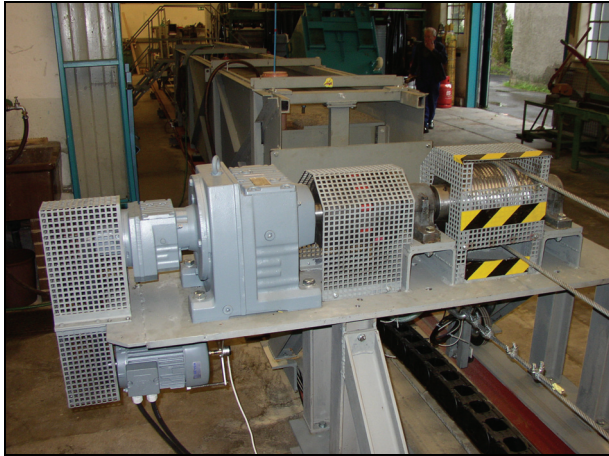


Abb. 8-5: Antriebseinheit der Seilzugvorrichtung

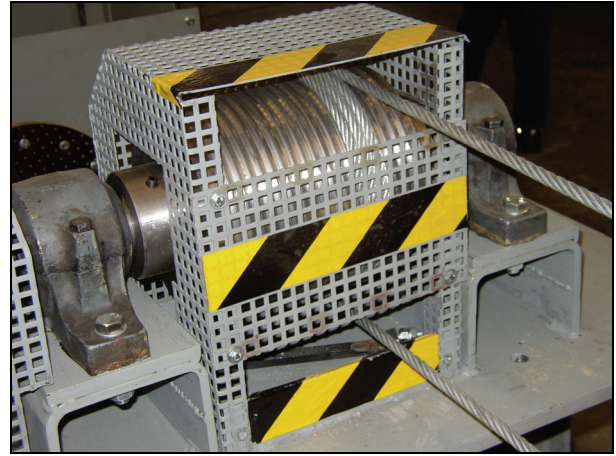


Abb. 8-6: Spilltrommel

Das umlaufende Zugseil ist an beiden Enden des Rohres angeschlagen. Durch eine Umkehr der Drehrichtung des Motors kann das Rohr in Messrichtung sowie wieder zurück in die Ausgangsposition verfahren werden.

Mittels der heckseitig installierten Spannvorrichtung kann eine zur Übertragung der Zugkraft notwendige Vorspannung auf das Stahlseil aufgebracht sowie die Seildehnung kompensiert werden.



Abb. 8-7: Heckseitige Seilspannvorrichtung

### 8.3 Schwingungsaggregate

Das Kernstück der Anlage bildet die im Rohr installierte Vibrationseinheit, mittels der die mechanischen Schwingungen erzeugt und auf das Rohr übertragen werden. Im Rahmen der Technikumsversuche wurden zwei unterschiedliche Typen von Schwingungsaggregaten mit unterschiedlichen Leistungen verwendet, die im Folgenden beschrieben werden.

#### PNEUMATISCHE SCHWINGUNGSEINHEIT

Für die ersten Versuchsreihen mit dem DN100 Stahlrohr wurde eine selbst gebaute, pneumatisch betriebene Vibrationseinheit konstruiert. Der zylindrische Gehäusekörper wurde entsprechend der erforderlichen Rohrdimension aus Aluminium gefertigt, in den das Turbinenrad eines serienmäßigen Druckluftvibrators vom Typ NCT 29i der Fa. NETTERVIBRATION integriert wurde. Das Turbinenlaufrad mit eingepresster Unwuchtmasse ist über Radialkugellager gelagert.

Um der Forderung nach einer rohrinternen Verspannung des Aggregates nachzukommen und um eine bestmögliche Übertragung der erzeugten Schwingungen auf das Rohr zu gewährleisten, wurden insgesamt sechs radial angeordnete Miniatur-Hydraulikzylinder vorgesehen, die über einen axialen Zugang mittels einer Handpumpe (Lukaspumpe) mit Hydraulikflüssigkeit beaufschlagt werden können. Die radiale Anordnung der Verspannzylinder ermöglicht eine zentrische Verspannung der Vibrationszelle im Rohr.

Die Regelung der Turbinendrehzahl und somit der eingeleiteten Schwingungsenergie erfolgt durch die Einstellung des statischen Luftdrucks über ein Regelventil.

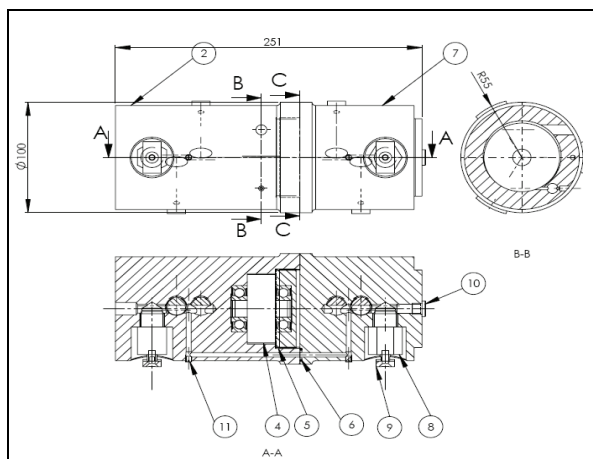


Abb. 8-8: Konstruktionszeichnung der pneumatischen rohrinternen Vibrationseinheit



Abb. 8-9: Fertig zusammengebaute pneumatische Vibrationseinheit

Mit Hilfe der eingesetzten Messtechnik konnte die, durch die Leistungsfähigkeit der institutseigenen Druckluftversorgungsanlage beeinflusste, erreichte Betriebsfrequenz in Abhängigkeit des jeweiligen Luftdrucks ermittelt werden. Unter Heranziehung der Herstellerdaten bzgl. des Originalaggregates, insbesondere des Unwuchtmoments  $M_e = 0,564 \text{ kgcm}$ , wurden unter Verwendung der Gleichungen (3.1) bis (3.4) die realisierten Betriebsdaten berechnet (Tab. 8-1).

Tab. 8-1: Errechnete Betriebsdaten des pneumatischen Innenvibrators

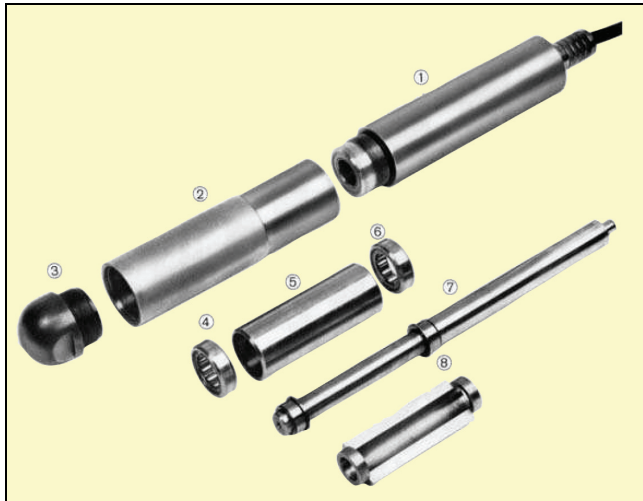
Stat. Luftdruck [bar]	4	5	6	7	8	9
Frequenz [ $s^{-1}$ , Hz]	88	96	104	112	120	128
Winkelgeschwindigkeit [ $1/s$ ]	553	603	653	704	754	804
Fliehkraft [N]	1.724	2.052	2.408	2.793	3.206	3.648

### ELEKTRISCHE SCHWINGUNGSEINHEIT

Im Rahmen der durchgeführten Zugversuche zeigte sich, insbesondere bei den verwendeten Rohren der Dimension DN150 und DN200, dass die mittels der pneumatischen Einheit eingeleiteten Schwingungsenergien offenbar nicht ausreichen, um eine effektive Zugkraftreduzierung herbeizuführen. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde eine leistungsfähigere Schwingungseinheit beschafft und für die weiteren Versuche verwendet.

Hierbei handelte es sich um ein elektrisch betriebenes Schwingungsaggregat, wie es für die Verdichtung von flüssigem Beton verwendet wird (Betonrüttler). Für die Versuchszwecke wurde ein entsprechendes Serienaggregat vom Typ NCZ 660 von der Fa. NETTERVIBRATION zur Verfügung gestellt und für den vorliegenden spezifischen Anwendungsfall konstruktiv modifiziert. Die Anpassung des Gerätes zur Verwendung im Versuchsstand erfolgte durch die Neufertigung der Außenhülse des Rüttlers, um einen passgenauen und zentrischen Einbau im Rohr zu erreichen.

Über einen Frequenzumrichter konnte die Drehzahl des Schwingungsaggregats in einem Bereich von 50 bis 200 Hz stufenlos geregelt werden.



- 1 - Stator des Elektromotors
- 2 - Außenhülse
- 3 - Gehäusespitze
- 4 - Kugel- bzw. Rollenlager
- 5 - Distanzhülse
- 6 - Kugel- bzw. Rollenlager
- 7 - Rotor
- 8 - Bronze-Unwucht

Abb. 8-10: Standard Elektro-Innenvibrator, NetterVibration

Die Berechnung der Betriebsdaten erfolgte in adäquater Weise wie zuvor beschrieben, die Berechnungsergebnisse in Abhängigkeit der gewählten Betriebsfrequenzen sind in Tab. 8-2 zusammengestellt.

Tab. 8-2: Errechnete Betriebsdaten des elektrischen Innenvibrators

Frequenz [ $s^{-1}$ , Hz]	50	80	100	120	150	180	200
Winkelgeschwindigkeit [1/s]	314	503	628	754	942	1.131	1.257
Fliehkraft [N]	533	1.364	2.132	3.070	4.797	6.907	8.527

### 8.4 Messtechnik

Die Messung der auftretenden Zugkraft beim Einziehen des Versuchsrohres erfolgt mittels einer Zugkraftmessdose, die über eine Anschlagvorrichtung am vorderen Ende des Rohres (lastseitig) mit dem Zugseil zentrisch verbunden ist. Der Messbereich der Dose reicht von 1 bis 100 kN, die Auswahl erfolgte gemäß der vorangegangenen Berechnung der maximal zu erwartenden Zugkraft unter Zugrundelegung der auftretenden Reibungskräfte.





Abb. 8-11: 100 kN Zugkraftmessdose

Zur Erfassung der Schwingungen, die über die interne Vibrationseinheit auf das Rohr übertragen werden, wurden die Versuchsrohre mit insgesamt drei Beschleunigungsaufnehmern bestückt, jeweils ein Sensor an den beiden Rohrenden und einer direkt im Gehäuse des Vibrators. Die Messaufnehmer lieferten Informationen über die Schwingungsfrequenz und Amplitude des Gesamtsystems bzw. des Schwingungsaggregates selbst. Die für die Datenaufnahme erforderlichen Steuer-, Regel- und Verstärkerelemente wurden entsprechend den technischen Vorgaben und Erfordernissen für die jeweiligen Messaufnehmer angefertigt.

Die Einziehgeschwindigkeit wurde mittels eines inkrementellen Drehgebers erfasst.

Alle erforderlichen Messgrößen werden über einen mobilen Messrechner aufgezeichnet. Durch den Einsatz entsprechender Software (DASYLab, FlexPro, MS Excel) konnten die verschiedenen Messwerte zusammengeführt und (grafisch) ausgewertet werden.

### **8.5 Zusatz- und Sicherheitseinrichtungen**

Als sicherheitstechnische Einrichtungen wurden kopf- und heckseitig elektrische Endschalter montiert, die bei Aktivierung, im Falle des Erreichens der Endstellung des Rohres, die Anlage stillsetzen (Abb. 8-12).

Da beim Einziehen der Versuchsrohre infolge der Mantelreibung hohe Seilkräfte auftraten, wurde nachträglich um die frei liegenden Zugseilabschnitte ein Käfig aus Metallgittern gebaut, um Material- und Personenschäden im Falle des Reißens des Zugseils zu verhindern.

Als Überquerungshilfe wurde eine Treppenkonstruktion aufgebaut, die den gefahrlosen Übergang über die Anlage gewährleistet.



Abb. 8-12: Elektrischer Endschalter

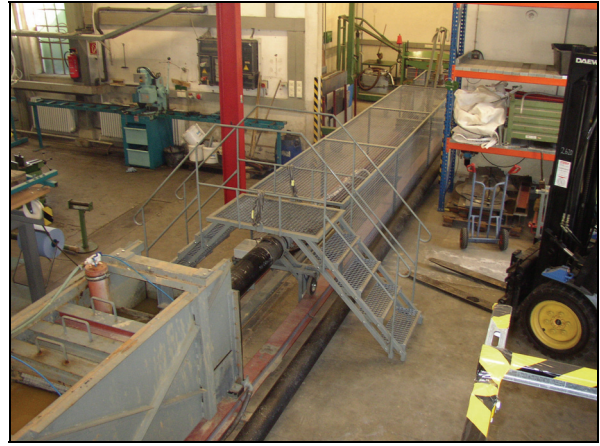


Abb. 8-13: Metallgitterkäfig und Treppenübergang

## 9 Versuchsergebnisse und Interpretation

Die folgenden Kapitel widmen sich der analytischen Auswertung und Interpretation der einzelnen Versuchsserien mit den darin vorgenommenen Parametervariationen. Vorrangig gilt es dabei, den Einfluss des Schwingungseintrags auf die erforderliche Einziehkraft aufzuzeigen und die dem zugrunde liegenden Effekte zu beschreiben.

### 9.1 Allgemeine Effekte des Schwingungseintrags

Grundsätzlich konnte durch die in Projektphase II erfolgten Technikumsversuche die Wirksamkeit des Vibrationsverfahrens im Sinne einer Zugkraftreduzierung abermals bestätigt werden. Die Versuchsreihen lieferten insgesamt aussagekräftige und reproduzierbare Ergebnisse, die für eine Dimensionsanalyse herangezogen werden können.

Prinzipiell zeigen die ermittelten Messkurven einen gleichen Verlauf. Alle Zugkraftmesswerte wurden als Funktion der Zeit bzw. des zurückgelegten Weges der Testrohre aufgezeichnet. Abb. 9-1 zeigt exemplarisch eine typische qualitative Zugkraftkennlinie nach Durchführung eines Zugversuchs im Sandboden. Der Verlauf der Zugkraftkurve ist dem Verlauf der Scherfestigkeit in einem  $\tau$ - $\sigma$ -Diagramm (s. Abb. 3-8) vergleichbar. Im ersten Abschnitt der Messkurve ist zunächst ein starker Anstieg der Zugkraft bis auf einen Spitzenwert, die initiale Losbrechkraft, zu verzeichnen, was auf die Überwindung der Haftreibung zwischen Rohrmanteloberfläche und dem umgebenden Bodenmaterial zurückzuführen ist. Nach Überwindung der Haftreibung wird im weiteren Verlauf der Kurve, durch den Übergang zur Gleitreibung, eine Verringerung der Zugkraft erkennbar, die sich im Idealfall auf einen konstanten Minimalwert über der Messstrecke einstellt. Beim Zuschalten der Schwingungseinheit tritt unmittelbar nach dem Hochlaufen eine deutlich erkennbare sprunghafte Reduzierung der Einziehkraft auf. Auch eine Verringerung der Losbrechkraft konnte durch die Einleitung von Schwingungen erzielt werden. Die auftretenden Gleitkräfte beim konstanten Einziehen kennzeichnen die Restscherfestigkeit des Bodenmaterials, die von den bodenmechanischen Größen ‚Winkel der inneren Reibung‘ und ‚Kohäsion‘ abhängt.

Zur Schaffung von Referenzwerten für die Einziehkraft wurden in einem ersten Schritt jeweils Zugversuche unter ausschließlicher Variation der statischen Auflast (Simulation eines Insitu-Überlagerungsdrucks) durchgeführt. Hierbei erfolgte kein Schwingungseintrag. Im Ergebnis konnte erwartungsgemäß festgestellt werden, dass sich sowohl die Losbrechkraft als auch die

Gleitkraft mit zunehmender Auflast (näherungsweise linear) erhöht. Dies gilt sowohl für beide untersuchten Bodenarten als auch für die verschiedenen Rohrdimensionen und Oberflächenbeschaffenheiten.

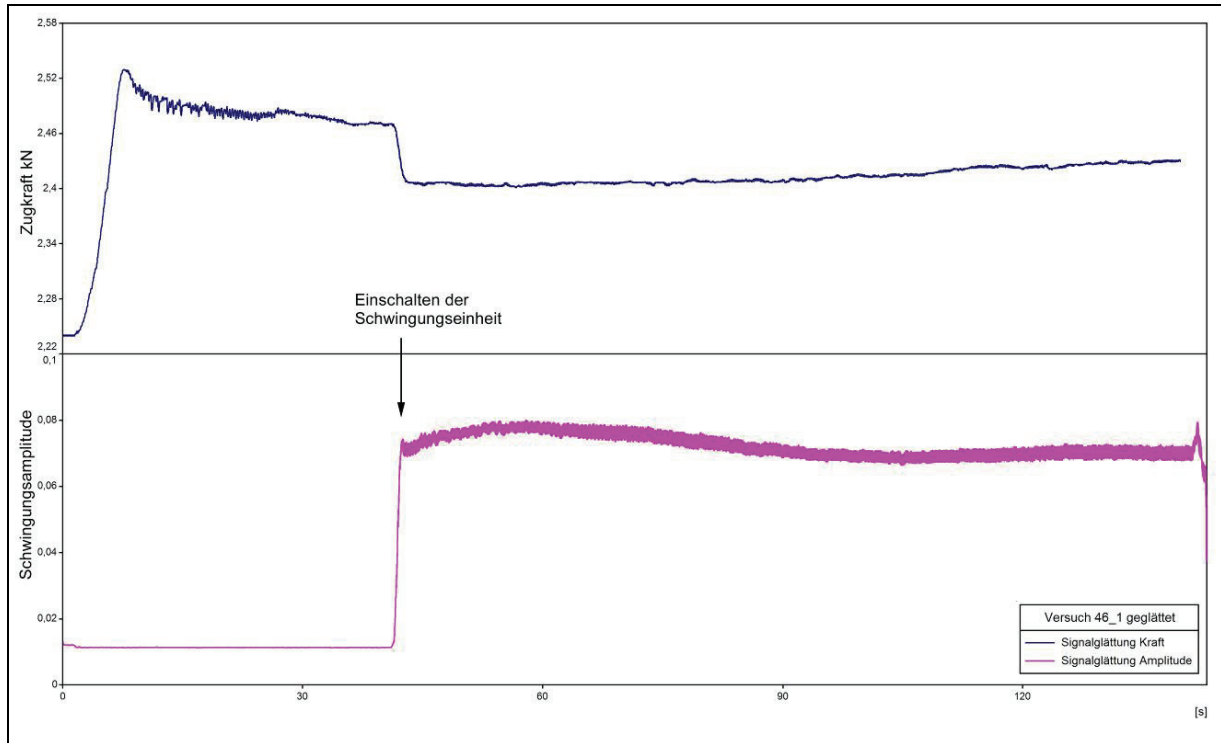


Abb. 9-1: Exemplarische Messkurve eines Zugversuchs im Sand mit erkennbarem Vibrationseffekt

Weitere Versuche, insbesondere unter Variation der statischen Auflast und beim unbeschichteten Stahlrohr, ergaben, dass der Verlauf der Zugkraft ohne Vibrationseinleitung nach dem Start der Messungen eine starke Schwankungsbreite aufweist (Wechselast). Beim Zuschalten des Vibrators ergibt sich ein konstanterer und ruhigerer Verlauf des Einziehvorgangs (Abb. 9-2). So kann die aus dem ruckartigen Einziehen (Slipstick-Effekte) resultierende Materialbelastung des Rohres nachhaltig und effektiv vermindert werden, bei gleichzeitiger Reduzierung der Zugkraft.

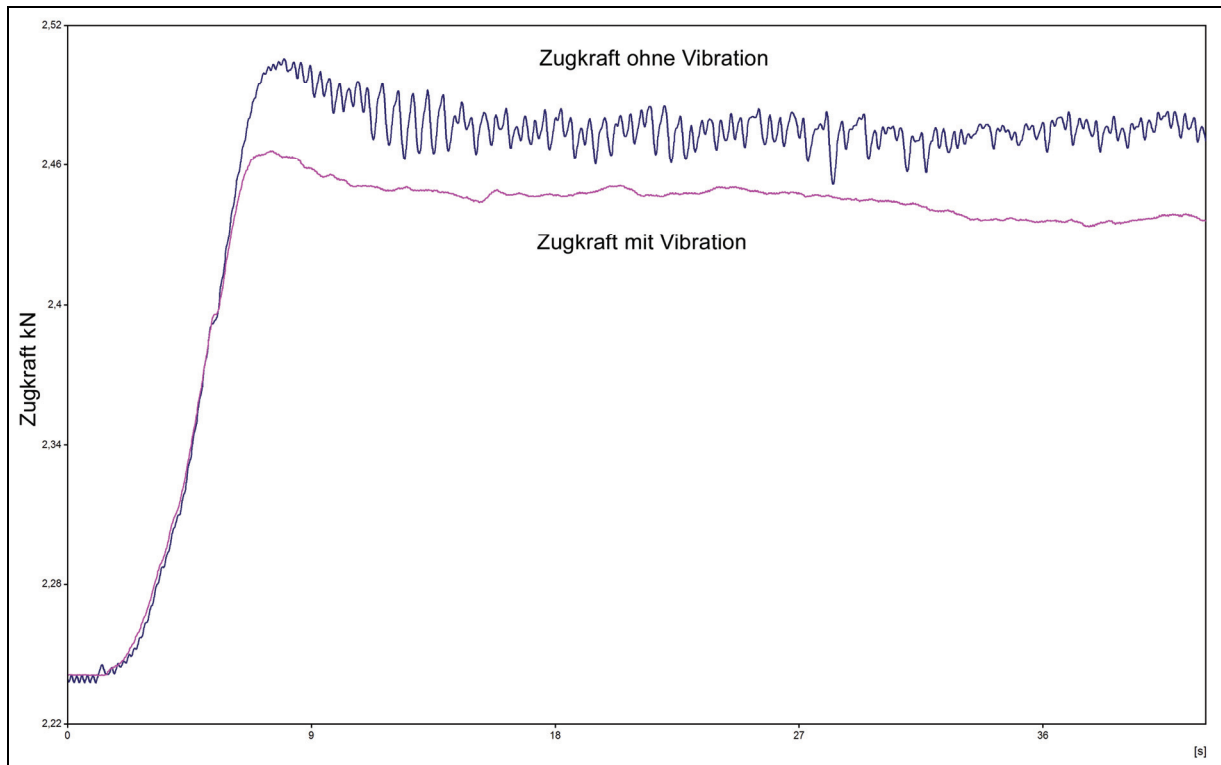


Abb. 9-2: Reduzierung der initialen Losbrechkraft und Gleitreibung durch Schwingungseinleitung sowie der Wechsellast beim Einziehvorgang

Als weitere variable Einflussgröße auf die Zugkraft wurde die Einziehgeschwindigkeit unter Beibehaltung aller übrigen Randbedingungen untersucht. Hierbei konnte festgestellt werden, dass die Verringerung der Geschwindigkeit mit einer Reduzierung der Einziehkraft einhergeht, was aus Abb. 9-3 hervorgeht. Die Einziehgeschwindigkeit wurde in Intervallen zwischen 0,5 m/min und 1 m/min verändert.

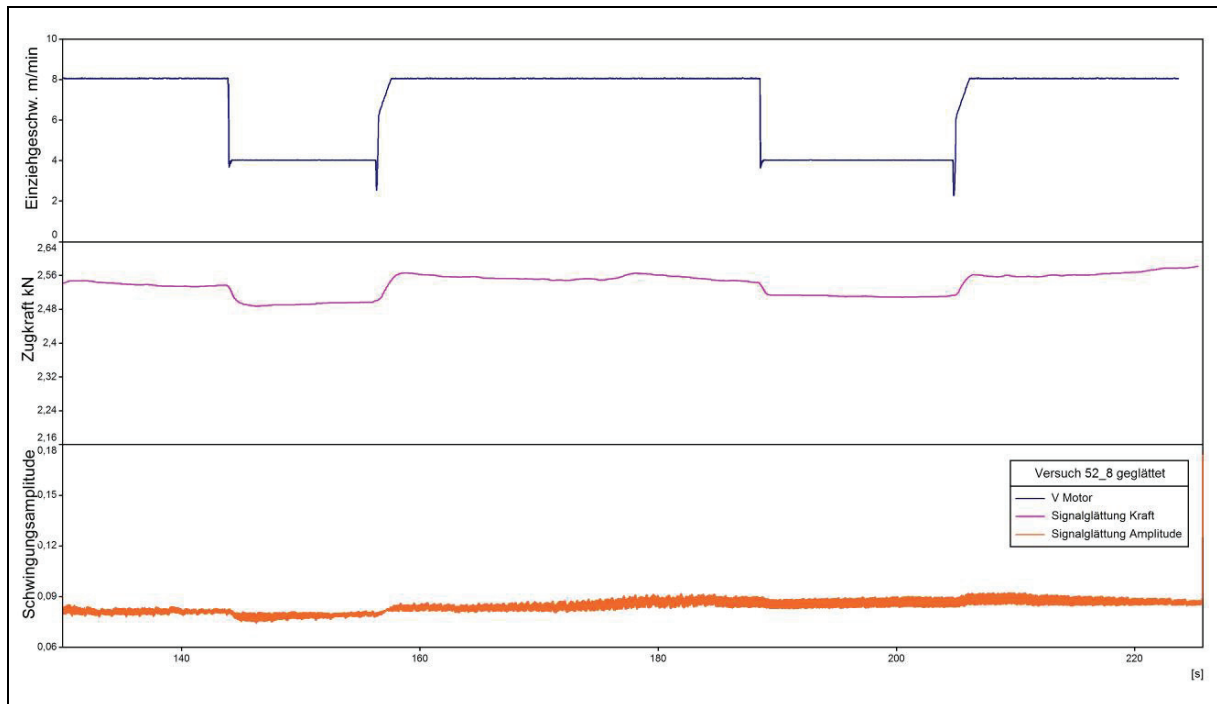


Abb. 9-3: Exemplarische Messwertkurve eines Zugversuchs mit unterschiedlichen Einziehgeschwindigkeiten

Die Schwingungsfrequenz stellt diejenige variable Einflussgröße dar, die es im Rahmen der Technikumsversuche mit dem Ziel der Zugkraftreduzierung hauptsächlich zu untersuchen galt. Die Zugkraftänderung unterliegt darüber hinaus weiteren Faktoren, die den erforderlichen Mindestschwingungseintrag determinieren. Zu diesen Parametern, die in den jeweiligen Versuchsserien sukzessive verändert und einer Untersuchung unterzogen wurden, zählen die statische Auflast, die Rohrgeometrie, die Oberflächenbeschaffenheit, die Art des Baugrunds sowie die Einziehgeschwindigkeit (s. Kapitel 7.2).

Wie die Versuchsergebnisse zeigten, führte in allen untersuchten Fällen der intensivste Schwingungseintrag bzw. die höchste verfügbare Vibratorfrequenz (200 Hz) zur effektivsten Reduzierung der Zugkraft. Dies gilt sowohl für die initiale Losbrechkraft, bei der die Haftreibung beim Anfahren der Anlage überwunden werden muss, als auch für die Gleitkraft, die sich während des geschwindigkeitskonstanten Einziehvorgangs einstellt.

Während bei einigen untersuchten Parameterkombinationen sog. ‚Sättigungseffekte‘ auftraten, d.h. im Rahmen der technisch realisierbaren Vibratordrehzahlen konnte ab einer bestimmten Schwingungsfrequenz keine weitere Zugkraftreduzierung erreicht werden (erkennbar an der asymptotischen Annäherung der Messwertkurven an die Horizontale im Bereich der hohen untersuchten Frequenzen), zeigten sich im Falle anderer Randbedingungen keine Sättigungseffekte, die im Umkehrschluss darauf schließen lassen, dass das mögliche Zugkraftminimum aufgrund der begrenzt verfügbaren Vibrationsfrequenz noch nicht erreicht werden konnte.

Eine detaillierte Betrachtung der Abhängigkeit der Einziehkraft von den verschiedenen untersuchten Kombinationen der Einflussgrößen folgt nachstehend.

Die bei den jeweiligen Versuchsserien mit den verschiedenen Rohren ermittelten Zugkraft-Messwertkurven sind in Anlage I bis IV dokumentiert.

### 9.2 Einfluss der Vibratorleistung

Wie die Messergebnisse der entsprechenden Versuchsserien belegen, wird die erforderliche Zugkraft unter Einbeziehung der gezielten Einleitung von Vibrationen von der Leistung des Schwingungserregers bestimmt, die wiederum abhängt von den maschinentechnischen Größen Drehzahl, Unwuchtmasse und Exzentrizität. Diese Parameter bestimmen die wirkende Zentrifugalkraft des Vibrators und damit die umgesetzte Leistung.

Der im Rahmen der Versuche verwendete elektrisch betriebene Betonrüttler verfügt mit einer nominalen Leistung von 1,9 kW (Zentrifugalkraft 8,5 kN) eine um den Faktor 2,3 höhere Leistung als das pneumatische Aggregat.

In den nachstehenden Abbildungen sind die jeweils ermittelten Messwertkurven für die beiden verwendeten Vibrationsaggregate vergleichend gegenübergestellt. Grundsätzlich zeigen die resultierenden Messwertkurven für die beiden verwendeten Vibratortypen in den Grenzen des gemeinsamen Drehzahlbereichs, mit Ausnahme der Gleitkraft bei 200 kN/m<sup>2</sup> Auflast, einen etwa parallelen Verlauf. Mit dem elektrischen Rüttler wurden insgesamt durchweg höhere Zugkraftreduzierungen erzielt, vor allem aufgrund der Tatsache, dass mit dem elektrischen Schwingungsaggregat höhere Frequenzen und damit ein höherer Schwingungsenergieeintrag realisiert werden konnte. Für die hier gezeigte Darstellung wurden die Messwerte für eine Frequenz von 120 Hz beim elektrischen Aggregat linear interpoliert.

Vor allem für den Vergleich der Gleitkraft bei einer Auflast von 200 kN/m<sup>2</sup> ergeben sich deutliche Unterschiede bei den gemessenen Werten: Während die mittels des pneumatischen Erregers initiierten Schwingungen keine bedeutenden Effekte im Sinne der Zugkraftreduzierung aufweisen, konnte mittels der elektrischen Einheit ein deutlicher Rückgang der Gleitkraft (ca. 4% bei 120 Hz) verzeichnet werden. Mit zunehmender Auflast verschwindet dieser Effekt wieder.

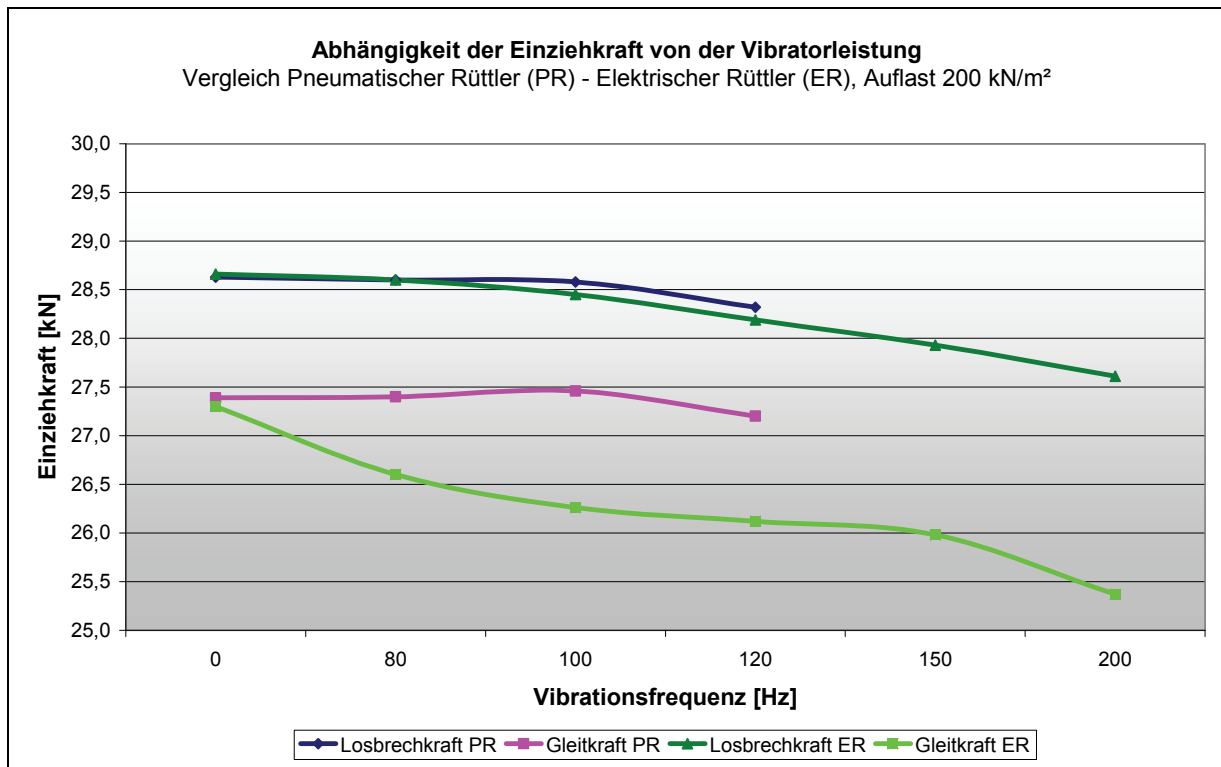


Abb. 9-4: Abhängigkeit der Einziehkraft von der Vibratorleistung, Auflast 200 kN/m<sup>2</sup>

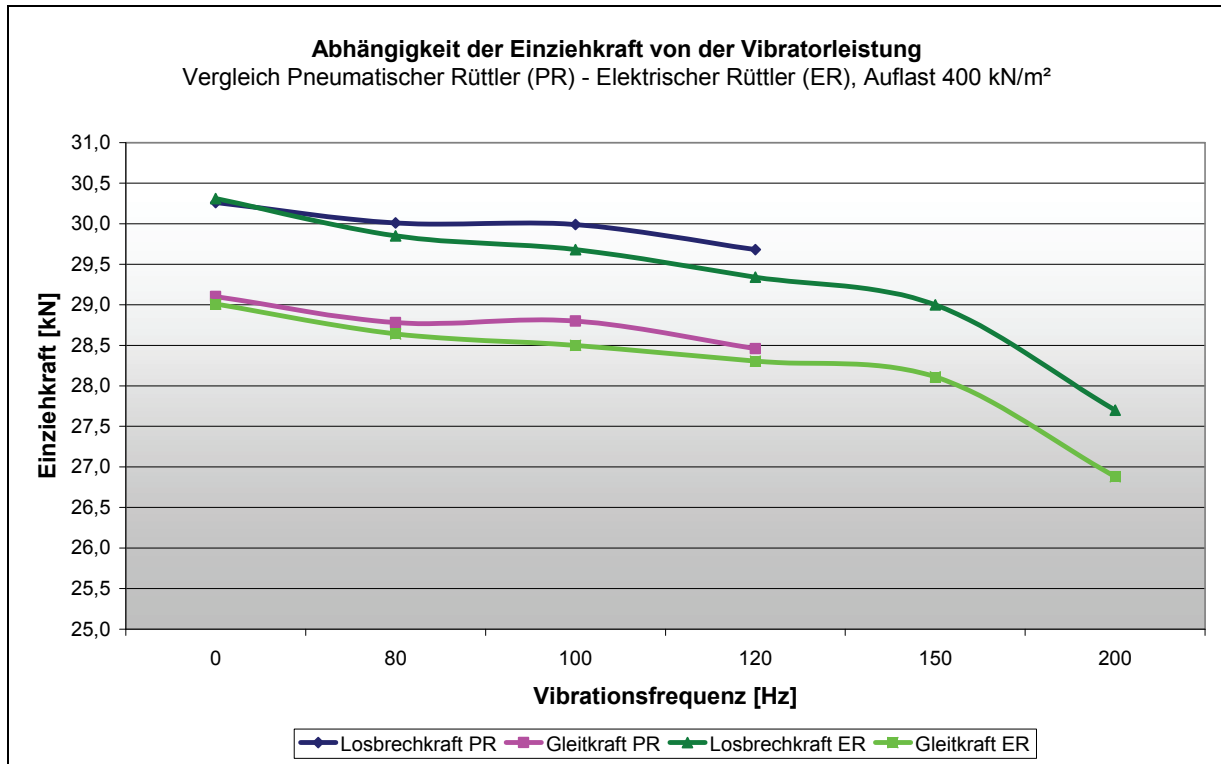


Abb. 9-5: Abhängigkeit der Einziehkraft von der Vibratorleistung, Auflast 400 kN/m<sup>2</sup>



### **9.3 Einfluss der statischen Auflast in Abhängigkeit des Schwingungseintrags**

Die Einleitung einer statischen Auflast mittels pneumatischer Hebekissen diente im Rahmen der Technikumsversuche der Simulation eines Insitu-Spannungszustandes des Baugrundes, resultierend aus einer entsprechenden Bodenüberdeckung bzw. Teufenlage des Bohrlochs. Aus dem Aufbringen der Auflast ergibt sich ein vollständiger Verschluss des Ringraums zwischen Rohrmantelfläche und Bohrkanal mit Bodenmaterial, wodurch im Prinzip ein instabiler Bohrlochzustand bzw. ein schwierig zu durchörternder Baugrund (partieller Zusammenbruch des Bohrlochs) simuliert wird (,Worst-Case-Betrachtung’).

In den Versuchsserien zur Untersuchung des Einflusses des Spannungszustandes des Modellbodens wurde die statische Auflast in ausgewählten Zugversuchen sukzessive auf 200 kN/m<sup>2</sup> und 400 kN/m<sup>2</sup> eingestellt. Dies entspricht in etwa einer Insitu-Bodenüberdeckung von 15 m bzw. 25 m.

Grundsätzlich gilt, dass die erforderliche Einziehkraft (sowohl die Losbrechkraft als auch die Gleitkraft) eine Funktion der Auflast ist, d.h. mit zunehmender Auflast erhöht sich aufgrund der verstärkten Reibwirkung entsprechend die Zugkraft.

Unter Berücksichtigung des Vibrationseintrags ist festzustellen, dass sich, unabhängig von der eingeleiteten Auflast, gleiche Effekte im Sinne der Zugkraftreduzierung ergeben, erkennbar am etwa parallelen Verlauf der Zugkraftkurven für die beiden untersuchten Auflastbeträge.

Die entsprechenden Messwertkurven für die ermittelte Losbrechkraft und Gleitkraft in Abhängigkeit der Lasteinleitung sind den nachstehenden Diagrammen sowie der zugehörigen Messwerttabelle (Tab. 9-1) zu entnehmen. In der Tabelle werden zusätzlich die auflastabhängigen prozentualen Zugkraftänderungen aufgeführt.

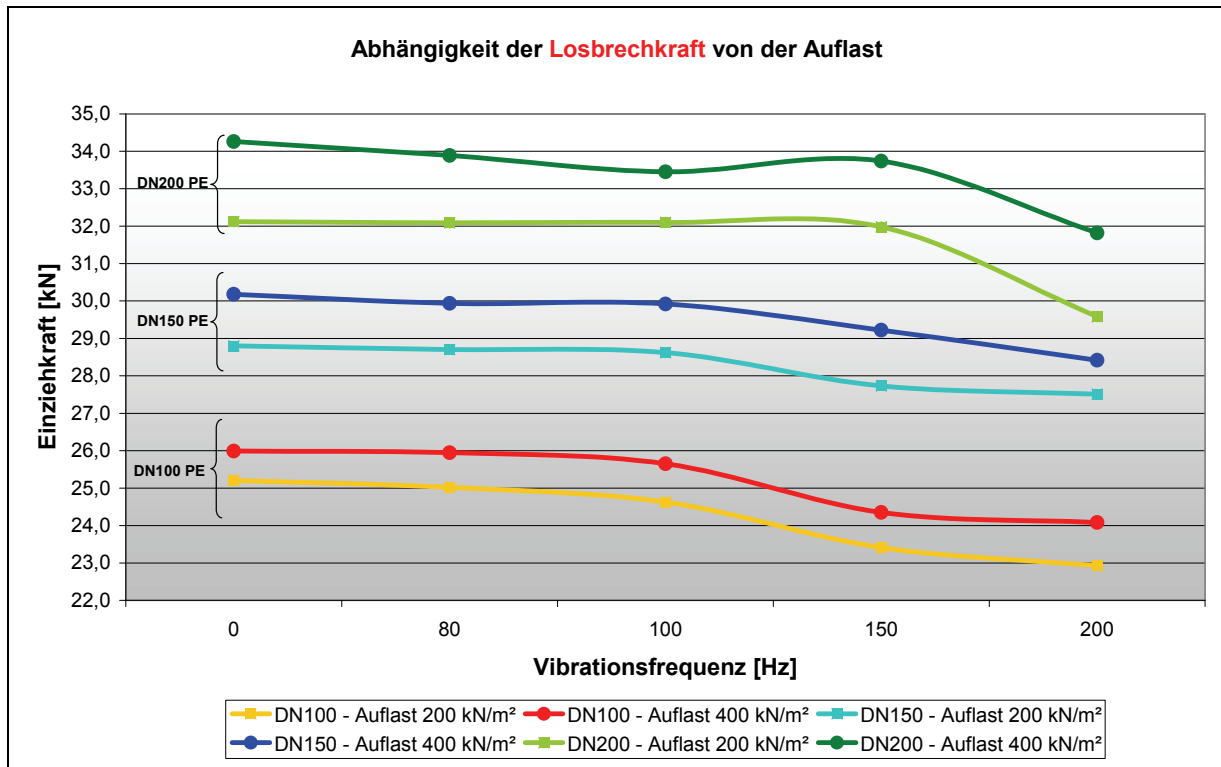


Abb. 9-6: Abhängigkeit der Losbrechkraft von der statischen Auflast

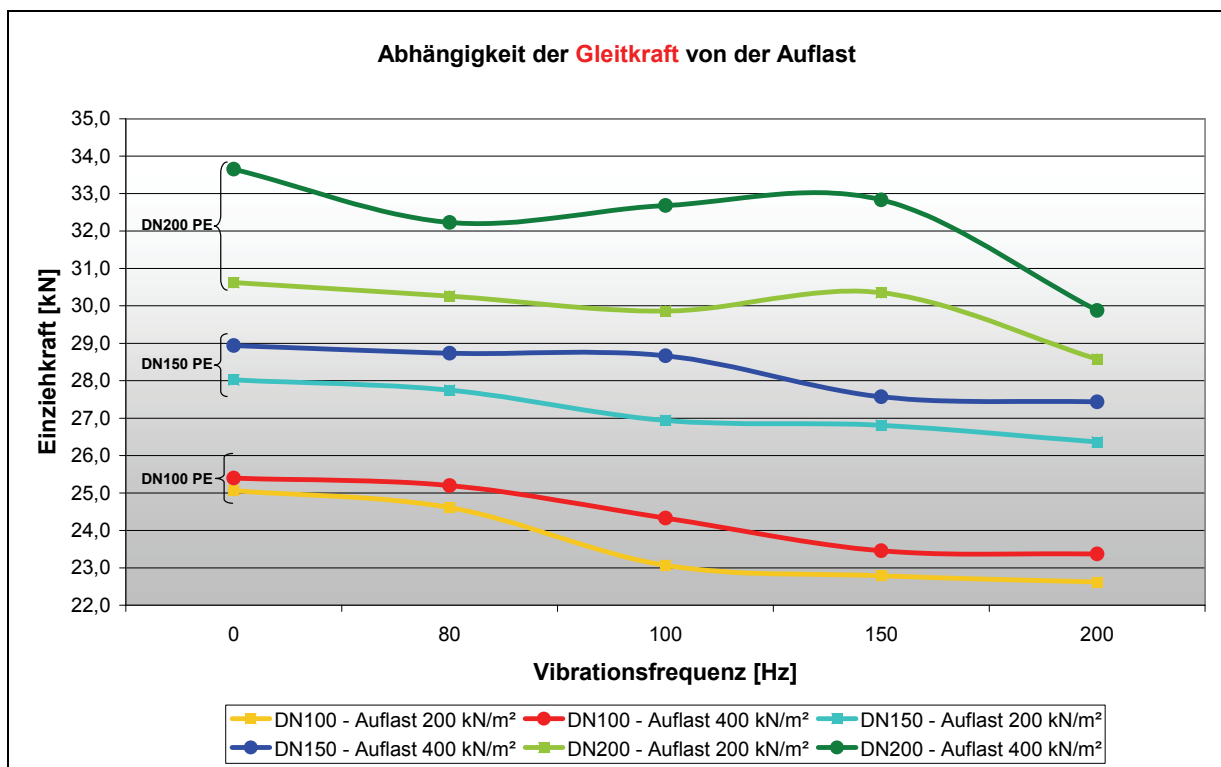


Abb. 9-7: Abhängigkeit der Gleitkraft von der statischen Auflast

Tab. 9-1: Messwerte der Zugkraftänderung in Abhängigkeit der statischen Auflast

<b>DN100 PE</b>						
Schwingungsfrequenz [Hz]	0	80	100	150	200	<b>Mittelwert</b>
<b>Losbrechkraft [kN]</b>						
Auflast 200 kN/m <sup>2</sup>	25,21	25,02	24,63	23,41	22,93	
Auflast 400 kN/m <sup>2</sup>	25,99	25,95	25,65	24,35	24,08	
Ø Zugkraftänderung [%]	3,0	3,6	4,0	3,9	4,8	<b>3,8</b>
<b>Gleitkraft [kN]</b>						
Auflast 200 kN/m <sup>2</sup>	25,06	24,61	23,07	22,79	22,62	
Auflast 400 kN/m <sup>2</sup>	25,40	25,20	24,33	23,46	23,37	
Ø Zugkraftänderung [%]	1,3	2,3	5,2	2,9	3,2	<b>3,0</b>
<b>DN150 PE</b>						
Schwingungsfrequenz [Hz]	0	80	100	150	200	<b>Mittelwert</b>
<b>Losbrechkraft [kN]</b>						
Auflast 200 kN/m <sup>2</sup>	28,80	28,70	28,62	27,73	27,51	
Auflast 400 kN/m <sup>2</sup>	30,18	29,94	29,92	29,22	28,42	
Ø Zugkraftänderung [%]	4,6	4,1	4,3	5,1	3,2	<b>4,3</b>
<b>Gleitkraft [kN]</b>						
Auflast 200 kN/m <sup>2</sup>	28,03	27,75	26,94	26,81	26,36	
Auflast 400 kN/m <sup>2</sup>	28,94	28,74	28,66	27,57	27,44	
Ø Zugkraftänderung [%]	3,2	3,4	6,0	2,8	3,9	<b>3,9</b>
<b>DN200 PE</b>						
Schwingungsfrequenz [Hz]	0	80	100	150	200	<b>Mittelwert</b>
<b>Losbrechkraft [kN]</b>						
Auflast 200 kN/m <sup>2</sup>	32,12	32,09	32,10	31,98	29,58	
Auflast 400 kN/m <sup>2</sup>	34,26	33,89	33,45	33,74	31,82	
Ø Zugkraftänderung [%]	6,2	5,3	4,0	5,2	7,0	<b>5,6</b>
<b>Gleitkraft [kN]</b>						
Auflast 200 kN/m <sup>2</sup>	30,62	30,26	29,86	30,35	28,58	
Auflast 400 kN/m <sup>2</sup>	33,65	32,23	32,68	32,83	29,88	
Ø Zugkraftänderung [%]	9,0	6,1	8,6	7,6	4,4	<b>7,1</b>

#### 9.4 Einfluss der Rohrgeometrie in Abhängigkeit des Schwingungseintrags

Mit zunehmendem Rohrdurchmesser sind aufgrund der größeren Mantel- bzw. Reibfläche erwartungsgemäß höhere Zugkräfte erforderlich. Um den reinen Einfluss der Rohrgeometrie in Abhängigkeit des Schwingungseintrags aufzuzeigen, werden im Folgenden die ermittelten Messwertkurven für die drei verwendeten PE-ummantelten Stahlrohre DN100, DN150 und DN200 vergleichend gegenübergestellt. Analog zur Rohrgeometrie kann im vorliegenden Fall auch das spezifische Gewicht der Rohre für den Vergleich angesetzt werden.

Nachstehende Grafiken dokumentieren die Ergebnisse der vergleichenden Gegenüberstellung zur Untersuchung des Einflusses der Rohrgeometrie. Wie zuvor erfolgt die Auswertung jeweils getrennt nach Losbrech- und Gleitkraft sowie für statische Auflasten von 200 und 400 kN/m<sup>2</sup>.

Die Auswertung der dargestellten Messwertkurven zeigt den allgemeinen Trend, dass mit zunehmender Rohrgeometrie ein entsprechend höherer Schwingungseintrag erforderlich ist, d.h. derjenige Punkt, ab dem bei einer bestimmten Schwingungsfrequenz eine Zugkraftreduzierung eintritt (erkennbar am abfallenden Ast der Kurve), verschiebt sich mit zunehmendem Rohrdurchmesser (analog mit zunehmender spezifischer Rohrmasse) nach rechts, also in den Bereich höherer Frequenzen.

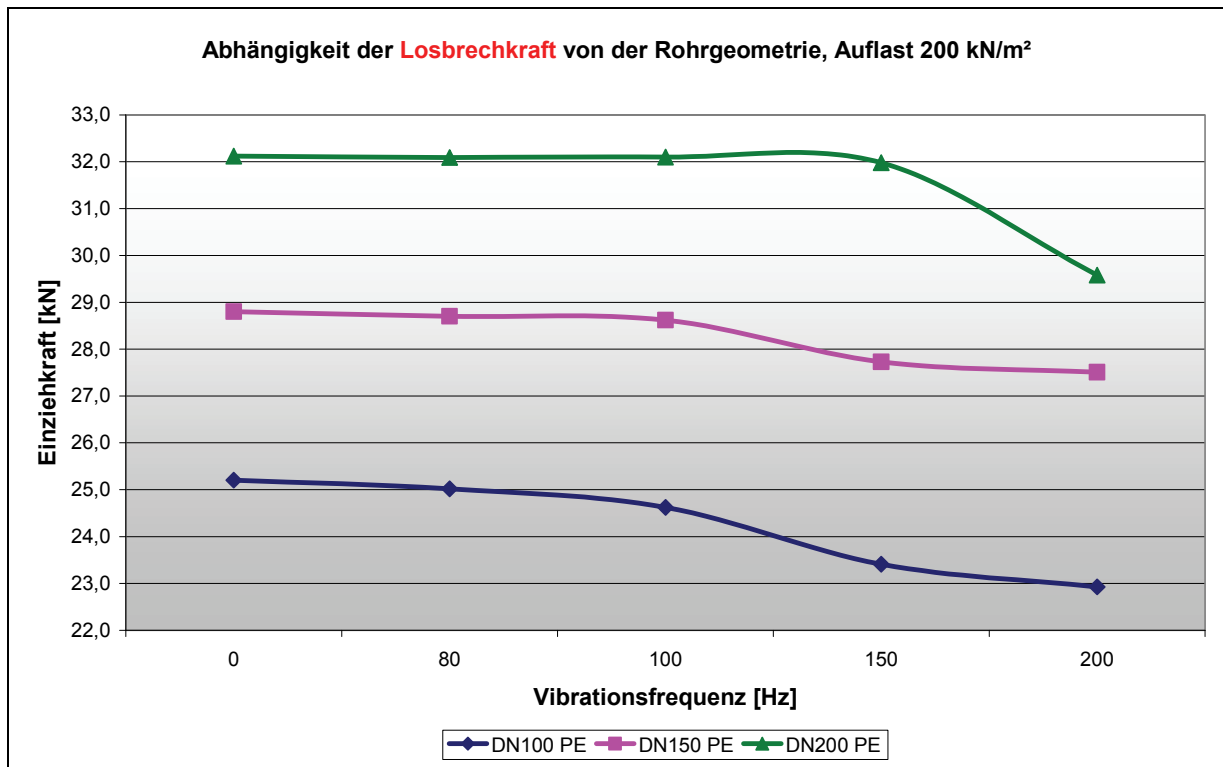


Abb. 9-8: Abhängigkeit der Losbrechkraft von der Rohrgeometrie, Auflast 200 kN/m<sup>2</sup>

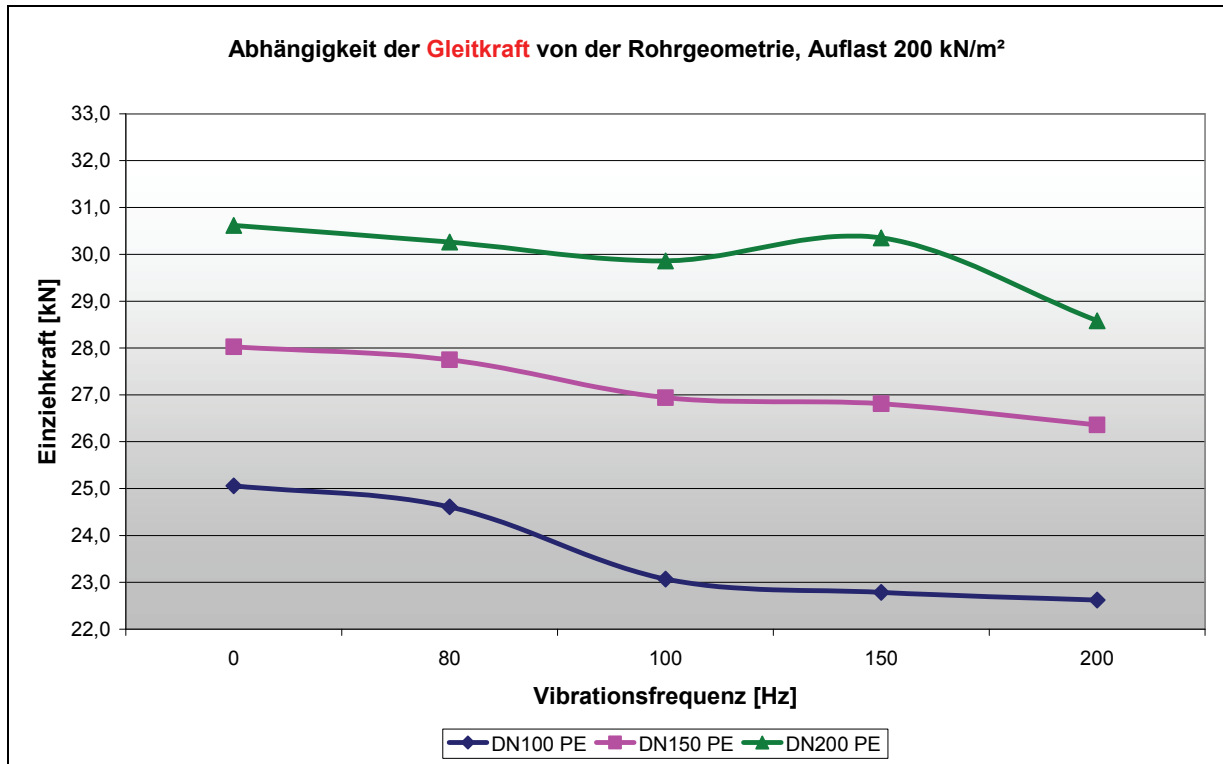


Abb. 9-9: Abhängigkeit der Gleitkraft von der Rohrgeometrie, Auflast 200 kN/m<sup>2</sup>

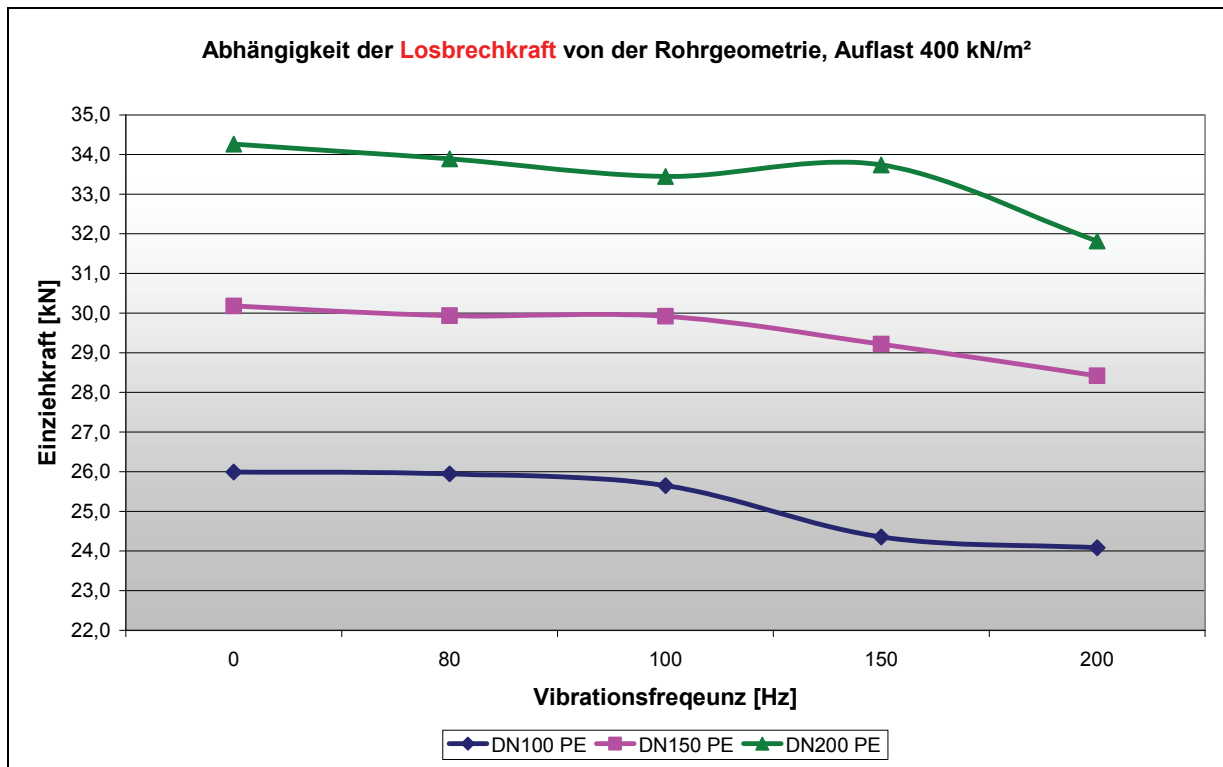


Abb. 9-10: Abhängigkeit der Losbrechkraft von der Rohrgeometrie, Auflast 400 kN/m<sup>2</sup>

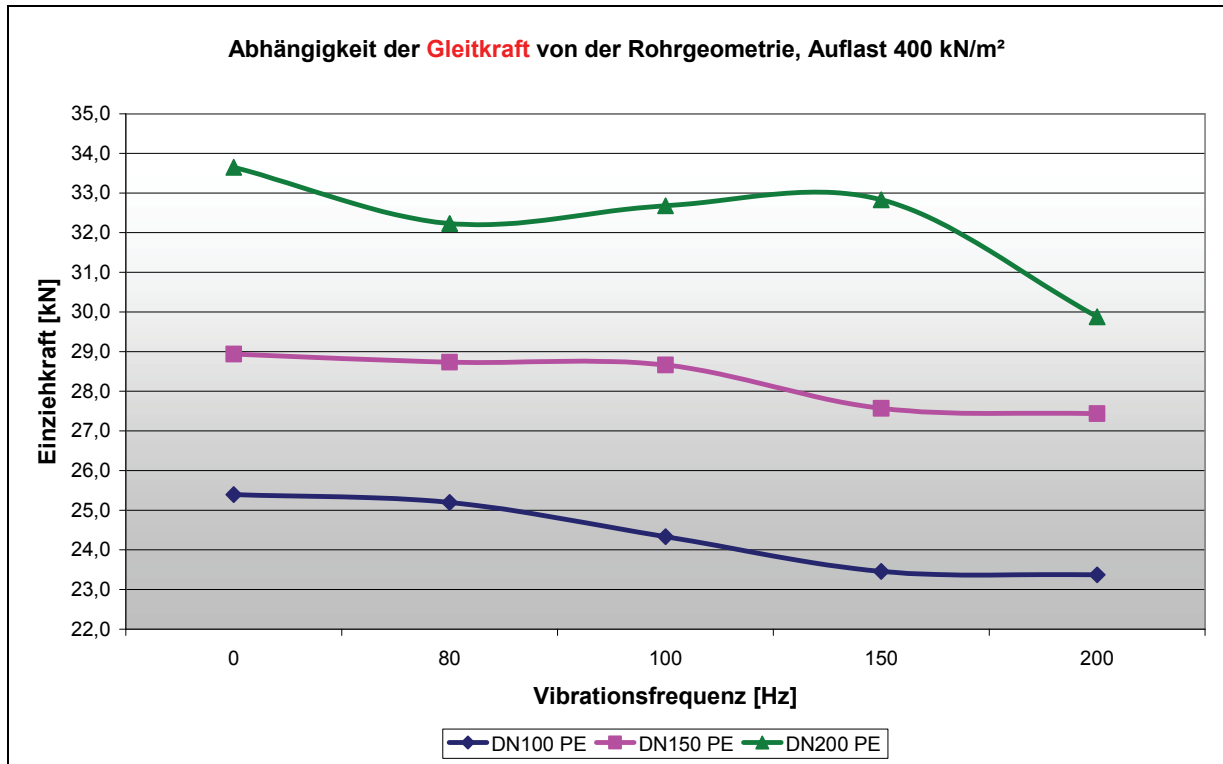


Abb. 9-11: Abhängigkeit der Gleitkraft von der Rohrgeometrie, Auflast 400 kN/m<sup>2</sup>

Die den oben dargestellten Abbildungen zugehörigen Messwerte sind den nachstehenden Tabellen zu entnehmen. Ferner enthalten sind die jeweiligen prozentualen Zugkraftänderungen der den Auswertungen zugrunde liegenden Referenzwerte (Vergleich DN100 - DN150, DN150 - DN200, DN100 - DN200, jeweils PE-ummantelte Stahlrohre).

Tab. 9-2: Messwerte der Zugkraftänderung in Abhängigkeit der Rohrgeometrie, Auflast 200 kN/m<sup>2</sup>

Vibrationsfrequenz [Hz]	0	80	100	150	200	
<b>DN100 PE-ummanteltes Rohr</b>						
Losbrechkraft [kN]	25,21	25,02	24,63	23,41	22,93	
Gleitkraft [kN]	25,06	24,61	23,07	22,79	22,62	
<b>DN150 PE-ummanteltes Rohr</b>						
Losbrechkraft [kN]	28,80	28,70	28,62	27,73	27,51	
Gleitkraft [kN]	28,03	27,75	26,94	26,81	26,36	
<b>DN200 PE-ummanteltes Rohr</b>						
Losbrechkraft [kN]	32,12	32,09	32,10	31,98	29,58	
Gleitkraft [kN]	30,62	30,26	29,86	30,35	28,58	
<b>Prozentuale Änderung der Zugkraft</b>						
Losbrechkraft [%]						<b>Mittelwert</b>
Vgl. DN100 - DN150	12,5	12,8	14,0	15,6	16,7	<b>14,3</b>
Vgl. DN150 - DN200	10,3	10,6	10,8	13,3	7,0	<b>10,4</b>
Vgl. DN100 - DN200	21,5	22,0	23,3	26,8	22,5	<b>23,2</b>
Gleitkraft [%]						
Vgl. DN100 - DN150	10,6	11,3	14,4	15,0	14,2	<b>13,1</b>
Vgl. DN150 - DN200	8,5	8,3	9,8	11,7	7,8	<b>9,2</b>
Vgl. DN100 - DN200	18,2	18,7	22,7	24,9	20,9	<b>21,1</b>

Tab. 9-3: Messwerte der Zugkraftänderung in Abhängigkeit der Rohrgeometrie, Auflast 400 kN/m<sup>2</sup>

Vibrationsfrequenz [Hz]	0	80	100	150	200	
<b>DN100 PE-ummanteltes Rohr</b>						
Losbrechkraft [kN]	25,99	25,95	25,65	24,35	24,08	
Gleitkraft [kN]	25,40	25,20	24,33	23,46	23,37	
<b>DN150 PE-ummanteltes Rohr</b>						
Losbrechkraft [kN]	30,18	29,94	29,92	29,22	28,42	
Gleitkraft [kN]	28,94	28,74	28,66	27,57	27,44	
<b>DN200 PE-ummanteltes Rohr</b>						
Losbrechkraft [kN]	34,26	33,89	33,45	33,74	31,82	
Gleitkraft [kN]	33,65	32,23	32,68	32,83	29,88	
<b>Prozentuale Änderung der Zugkraft</b>						
Losbrechkraft [%]						<b>Mittelwert</b>
Vgl. DN100 - DN150	13,9	13,3	14,3	16,7	15,3	<b>14,7</b>
Vgl. DN150 - DN200	11,9	11,7	10,6	13,4	10,7	<b>11,6</b>
Vgl. DN100 - DN200	24,1	23,4	23,3	27,8	24,3	<b>24,6</b>
Gleitkraft [%]						
Vgl. DN100 - DN150	12,2	12,3	15,1	14,9	14,8	<b>13,9</b>
Vgl. DN150 - DN200	14,0	10,8	12,3	16,0	8,2	<b>12,3</b>
Vgl. DN100 - DN200	24,5	21,8	25,6	28,6	21,8	<b>24,5</b>

## 9.5 Einfluss der Einziehgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Schwingungseintrags

Die Einziehgeschwindigkeit bei der grabenlosen Installation von Produktrohren mittels HDD stellt eine variable Prozessgröße dar, die einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Zugkraft nimmt. In der Praxis ist es üblich, im Falle eines plötzlichen Zugkraftanstiegs die Einziehgeschwindigkeit herabzusetzen. Diese Maßnahme geht dann im Allgemeinen mit einer Reduzierung der Einziehkraft einher, erhöht jedoch gleichzeitig den Zeitbedarf bei der Fertigstellung des Vorhabens.

Die Technikumsversuche zur Untersuchung dieses Effekts belegten die Wirksamkeit dieser Praxis. Mit allen verwendeten Rohren wurden gemäß eines zuvor festgelegten Testprogramms ausgewählte Versuche unter Variation der Einziehgeschwindigkeit und unter Beibehaltung der sonstigen Randbedingungen vorgenommen. Maßgeblich für die Betrachtung ist die jeweils gemessene Gleitkraft. Die Kurven, jeweils für die Einziehgeschwindigkeit von 1 m/min und 0,5 m/min, verlaufen in etwa parallel und es zeigen sich auch im Hinblick auf die zusätzliche Schwingungseinleitung annähernd konstante Differenzbeträge für die Zugkraft (hier: im Sandboden). Daraus kann im Umkehrschluss gefolgert werden, dass zwischen der Einziehgeschwindigkeit und dem Schwingungseintrag, im Hinblick auf die Zugkraftreduzierung, keine direkte Abhängigkeit besteht (gültig für den Baugrund ‚Sand‘).



Die Verringerung der Einziehgeschwindigkeit kann somit zusätzlich zum Schwingungseintrag eine Reduzierung der Einziehkraft bewirken.

Beim DN100 Stahlrohr ohne PE-Ummantelung konnten, resultierend aus der Halbierung der Einziehgeschwindigkeit auf 0,5 m/min im Sandboden, nur geringe Effekte im Sinne der Zugkraftreduzierung in einer Größenordnung von durchschnittlich rund 2,8%, ermittelt werden. Für die PE-ummantelten Stahlrohre (DN100, DN150 und DN200) belief sich die Zugkraftreduzierung infolge der Verringerung der Einziehgeschwindigkeit auf durchschnittliche Werte zwischen 5,3 und 5,7%. Eine entsprechende Zusammenstellung der Messergebnisse für Sandboden enthält Tab. 9-4.

Tab. 9-4: Messwerte der Zugkraftreduzierung in Abhängigkeit der Einziehgeschwindigkeit im Sandboden

Vibrationsfrequenz [Hz]	0	80	100	150	200	Mittelwert
<b>DN100 Stahlrohr ohne Ummantelung</b>						
1 m/min	27,30	26,6	26,26	25,98	25,37	
0,5 m/min	26,56	26	25,32	25,10	24,80	
Ø Zugkraftreduzierung [%]	2,7	2,3	3,6	3,4	2,2	<b>2,8</b>
<b>DN100 PE-ummanteltes Stahlrohr</b>						
1 m/min	25,40	25,20	24,33	23,46	23,37	
0,5 m/min	24,06	23,745	23,17	22,25	22,08	
Ø Zugkraftreduzierung [%]	5,3	5,8	4,8	5,1	5,5	<b>5,3</b>
<b>DN150 PE-ummanteltes Stahlrohr</b>						
1 m/min	29,90	29,73	29,66	28,86	28,01	
0,5 m/min	28,50	28,5	27,85	26,81	26,21	
Ø Zugkraftreduzierung [%]	4,7	4,1	6,1	7,1	6,4	<b>5,7</b>
<b>DN200 PE-ummanteltes Stahlrohr</b>						
1 m/min	30,62	30,61	30,45	30,32	28,58	
0,5 m/min	28,88	28,89	28,61	28,57	27,51	
Ø Zugkraftreduzierung [%]	5,7	5,6	6,0	5,8	3,8	<b>5,4</b>

Im bindigen Modellboden (Schluff) konnten im Mittel höhere Zugkraftreduzierungen (ca. 7,6%) infolge der Verringerung der Einziehgeschwindigkeit erreicht werden. Vor allem im Bereich der hohen Schwingungsfrequenzen, die generell in diesem Bodenmaterial für eine effektive Zugkraftreduzierung erforderlich sind, zeigten sich relativ hohe Zugkraftdifferenzen (11,8% bei 200 Hz). Eine Erklärung hierfür liefert der Umstand, dass zum Aufbau einer durch die eingeleiteten Vibrationen entstehenden schmalen Bodenverflüssigungszone (Mobilisierung des Porenwassers) im Bereich der Rohrmanteloberfläche bei geringer Einziehgeschwindigkeit mehr Zeit zur Verfügung steht und sich die Zone infolge dessen vollständiger aufbauen kann. Im kohäsiven Baugrund besteht folglich, im Gegensatz zum rolligen Bodenmaterial, ein Zusammenhang zwischen Schwingungseintrag und Einziehgeschwindigkeit.

Die entsprechenden Messwerte, die im Rahmen der Versuche mit dem DN200 PE-ummantelten Rohr im Schluffboden ermittelt wurden, sind in Tab. 9-5 zusammengestellt.

Tab. 9-5: Messwerte der Zugkraftreduzierung in Abhängigkeit der Einziehgeschwindigkeit im Schluffboden

<b>DN200 PE-ummanteltes Stahlrohr, Schluffboden</b>						
Vibrationsfrequenz [Hz]	0	80	100	150	200	<b>Mittelwert</b>
1 m/min	27,89	27,81	27,10	25,32	23,86	
0,5 m/min	26,10	26,02	25,84	23,14	21,03	
Ø Zugkraftreduzierung [%]	6,4	6,4	4,6	8,6	11,8	<b>7,6</b>

### 9.6 Einfluss der Rohrmanteloberflächenbeschaffenheit in Abhängigkeit des Schwingungseintrags

In der Praxis werden aus Gründen des Korrosions- und mechanischen Verschleißschutzes nahezu ausschließlich kunststoffbeschichtete bzw. -ummantelte Rohre beim grabenlosen Rohrvortrieb verwendet. Nicht zuletzt begünstigen auch die besseren Gleiteigenschaften der Rohraußenummantelung (geringerer Reibbeiwert) den Erfolg eines HDD-Projektes. Diese Erfahrungen konnten auch im Rahmen der Technikumsversuche nachvollzogen bzw. bestätigt werden.

Das Aufzeigen des Einflusses der Rohroberflächenbeschaffenheit auf die erforderliche Einziehkraft erfolgte anhand der Gegenüberstellung der ermittelten Messwertkurven für das DN100 Stahlrohr ohne Ummantelung und das DN100 PE-ummantelte Stahlrohr, jeweils getrennt nach Losbrech- und Gleitkraft. Da beide Rohre gleiche Geometrien (Außendurchmesser) aufweisen und die Versuchsdurchführung des Weiteren unter der Prämisse gleicher sonstiger Randbedingungen (Bodenmaterial, Einziehgeschwindigkeit, Auflast, etc.) erfolgte, können die entsprechenden Messwerte direkt miteinander verglichen werden. Die dargestellten Differenzen bei den jeweiligen Zugkraftkurven können damit ausschließlich auf die Beschaffenheit der Rohraußenoberfläche (Stahl, PE) zurückgeführt werden.

Abb. 9-12 und Abb. 9-13 zeigen den Einfluss der Rohrummantelung im Hinblick auf die erforderliche Einziehkraft (Losbrech- und Gleitkraft) in Abhängigkeit der statischen Auflast, und ohne Vibrationseintrag.

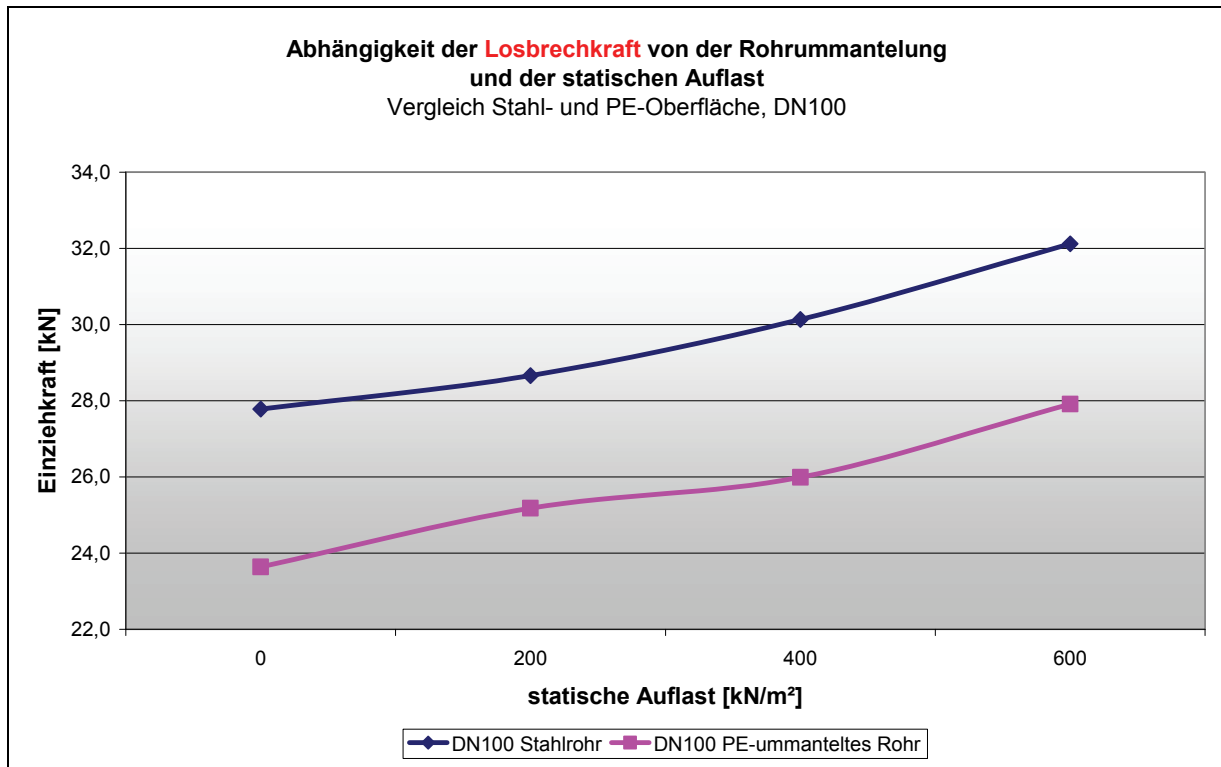


Abb. 9-12: Gegenüberstellung der Messwerte für die Losbrechkraft in Abhängigkeit der Rohrmanteloberfläche

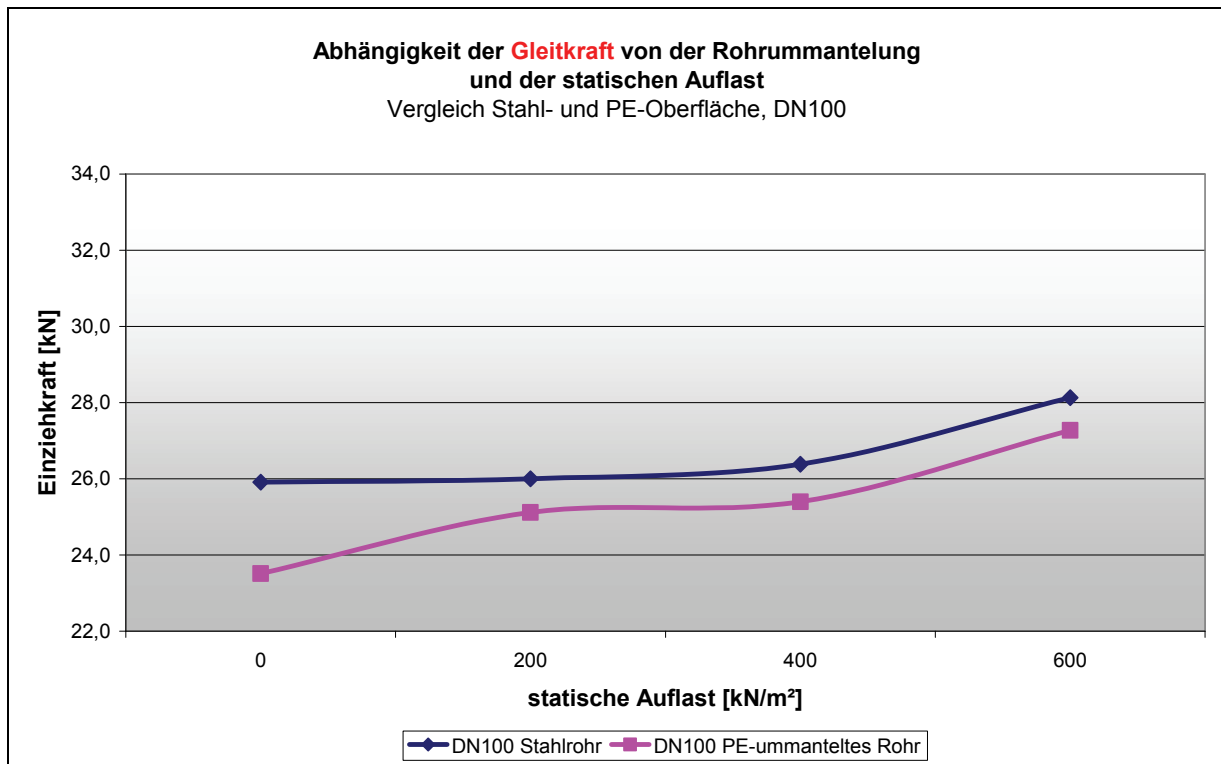


Abb. 9-13: Gegenüberstellung der Messwerte für die Gleitkraft in Abhängigkeit der Rohrmanteloberfläche und statischen Auflast

Während sich bei der Gleitkraft beim DN100 PE-ummantelten Stahlrohr lediglich eine Verringerung der Zugkraft um durchschnittlich 4,9% gegenüber dem DN100 Stahlrohr ohne Ummantelung ergibt, liegt die Zugkraftreduktion bei Betrachtung der Losbrechkraft in der Größenordnung von durchschnittlich 13,5%. Die zugehörigen Messwerte sowie die prozentualen Zugkraftverringerungen sind der nachstehenden Tab. 9-6 zu entnehmen.

Tab. 9-6: Messwerte der Zugkraftreduktion in Abhängigkeit der Rohrummantelung und Auflast

Auflast [kN/m <sup>2</sup> ]	0	20	40	60	Mittelwert
<b>DN100 Stahlrohr ohne Ummantelung, ohne Vibration</b>					
Losbrechkraft [kN]	27,78	28,66	30,13	32,12	
Gleitkraft [kN]	25,91	26,00	26,38	28,13	
<b>DN100 PE-ummanteltes Stahlrohr, ohne Vibration</b>					
Losbrechkraft [kN]	23,64	25,18	25,99	27,91	
Gleitkraft [kN]	23,51	25,12	25,40	27,27	
<b>Prozentuale Änderung der Zugkraft</b>					
Losbrechkraft [%]	14,9	12,1	13,7	13,1	<b>13,5</b>
Gleitkraft [%]	9,3	3,4	3,7	3,1	<b>4,9</b>

Unter dem Einfluss von Schwingungen konnten im Rahmen der Versuche auf die Rohrmantelbeschaffenheit zurückzuführende Zugkraftdifferenzen von durchschnittlich 14,2% bei der Losbrechkraft (Abb. 9-14) und 10,2% bei der Gleitkraft (Abb. 9-15) ermittelt werden.

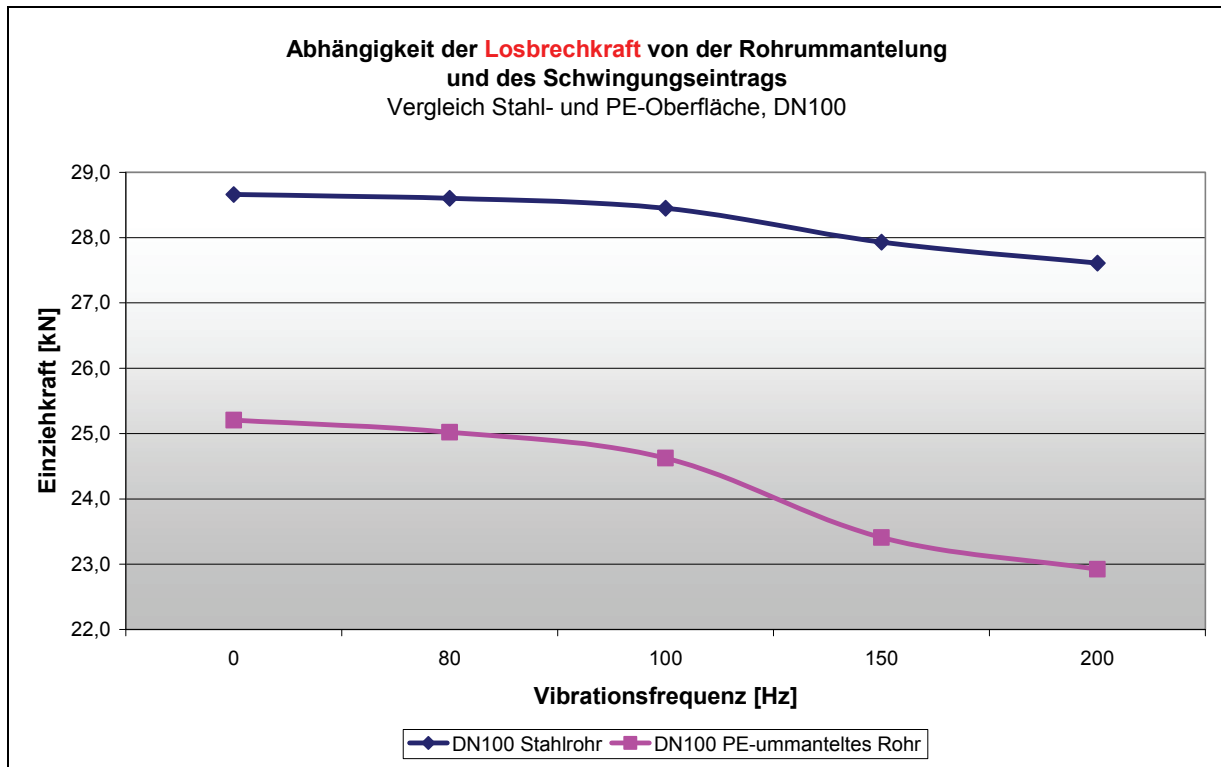


Abb. 9-14: Gegenüberstellung der Messwerte für die Losbrechkraft in Abhängigkeit der Rohrmanteloberfläche und des Schwingungseintrags

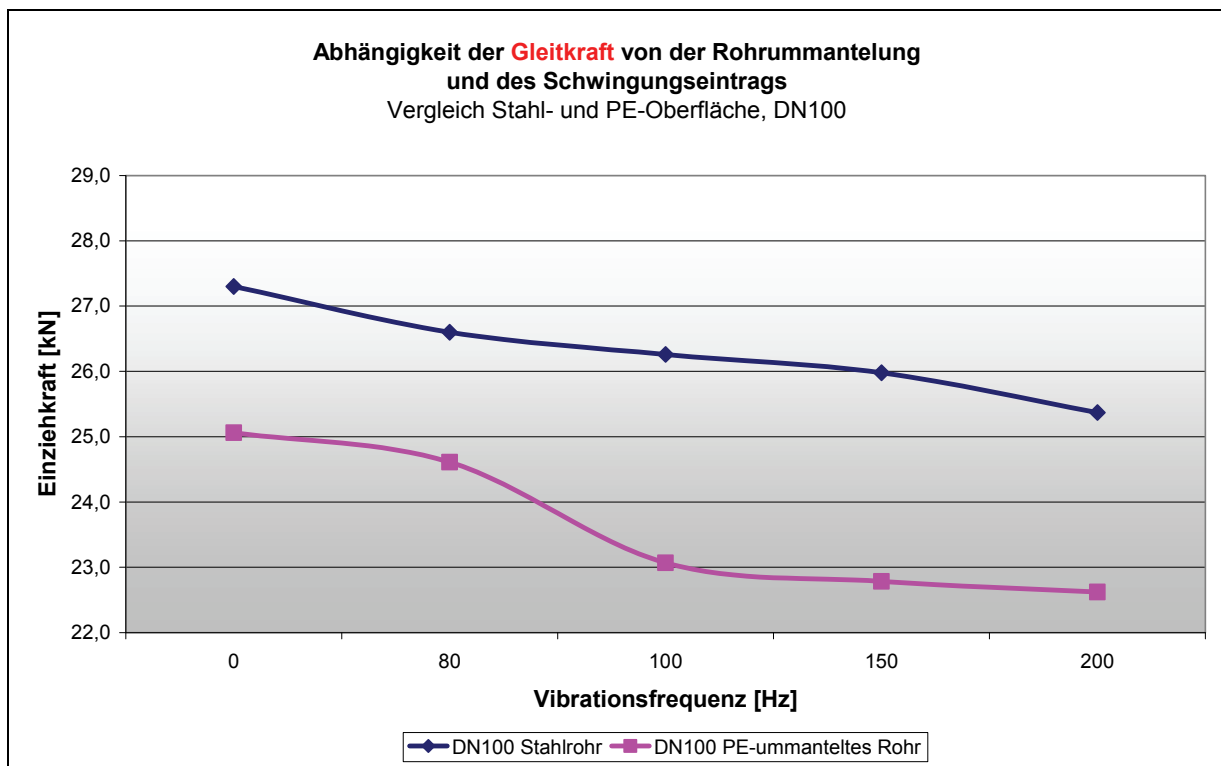


Abb. 9-15: Gegenüberstellung der Messwerte für die Gleitkraft in Abhängigkeit der Rohrmanteloberfläche und des Schwingungseintrags

Die entsprechenden Messwertpaare sowie die prozentuale Veränderung der Zugkraft gehen aus Tab. 9-7 hervor.

Tab. 9-7: Messwerte der Zugkraftreduktion in Abhängigkeit der Rohrummantelung und Vibrationsfrequenz

Vibrationsfrequenz [Hz]	0	80	100	150	200	Mittelwert
<b>DN100 Stahlrohr ohne Ummantelung</b>						
Losbrechkraft [kN]	28,66	28,6	28,45	27,93	27,61	
Gleitkraft [kN]	27,3	26,6	26,26	25,98	25,37	
<b>DN100 PE-ummanteltes Stahlrohr</b>						
Losbrechkraft [kN]	25,21	25,02	24,63	23,41	22,93	
Gleitkraft [kN]	25,06	24,61	23,07	22,79	22,62	
<b>Prozentuale Änderung der Zugkraft</b>						
Losbrechkraft [%]	12,1	12,5	13,4	16,2	17,0	<b>14,2</b>
Gleitkraft [%]	8,2	7,5	12,1	12,3	10,8	<b>10,2</b>

Im Rahmen der Versuchsreihen mit dem DN100 Rohr ohne PE-Ummantelung war bei ausgeschaltetem Vibrationsaggregat keine gleichmäßige Einziehbewegung zu beobachten. Diese Slipstick-Effekte, hervorgerufen durch einen permanenten Wechsel zwischen Haften und Gleiten, die im Technikum zusätzlich durch die zyklische Dehnung und Entspannung des Zugseils während des Einziehvorgangs begünstigt wurden, verstärkten sich mit zunehmender statischer Auflast.

Ausgewählte Zugversuche zur Untersuchung dieser Erscheinungen zeigten, dass für eine Auflast von 0 kN/m<sup>2</sup> ab einem Schwingungseintrag von >80 Hz eine Vergleichmäßigung der Zugbewegung auftrat, d.h. die Slipstick-Effekte, die eine zusätzliche Belastung des Rohres darstellen, wurden bereits bei niedrigen Schwingungseinträgen vermieden. Für höher gewählte statische Auflastspannungen von 200 und 400 kN/m<sup>2</sup> sind jeweils Schwingungsfrequenzen >100 Hz erforderlich, um eine gleichmäßige Gleitbewegung herbeizuführen.

Bei allen untersuchten PE-ummantelten Stahlrohren traten im Gegensatz zum blanken Stahlrohr keine derartigen Effekte auf, d.h. der Übergang von der Haftreibung zur Gleitreibung erfolgt fließend und ohne messbare Lastspitzen.

## 9.7 Einfluss der Baugrundbeschaffenheit in Abhängigkeit des Schwingungseintrags

Die Untersuchungen zur Ermittlung des Einflusses der Art des Baugrunds (rolliger bzw. bindiger Boden) in Abhängigkeit des Vibrationseintrags wurden mit dem DN200 PE-ummantelten Stahlrohr durchgeführt. Das bindige Schluffmaterial wurde lagenweise im

erdfeuchten Zustand in den Versuchsstand eingebaut, um homogene und gleichmäßige Bettungsbedingungen des Rohres zu gewährleisten. Zusätzlich wurde in ausgewählten Messreihen die statische Auflast variiert ( $200 \text{ kN/m}^2$  und  $400 \text{ kN/m}^2$ ).

In den nachstehenden Abbildungen sind die entsprechenden Messwertkurven für die verwendeten Modellböden Sand und Schluff, getrennt nach Losbrech- und Gleitkraft sowie für unterschiedliche Auflasten vergleichend, dargestellt.

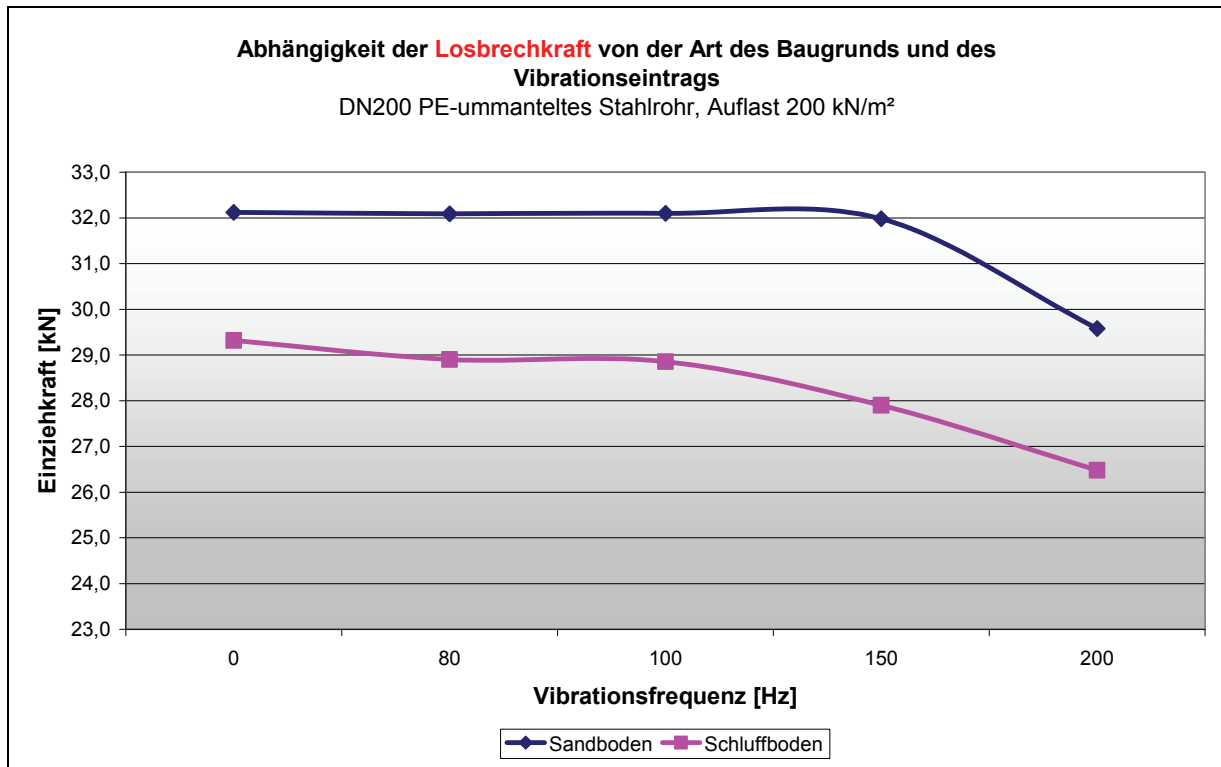


Abb. 9-16: Gegenüberstellung der Messwerte für die Losbrechkraft in Abhängigkeit des Baugrunds und des Schwingungseintrags, Auflast 200 kN/m<sup>2</sup>

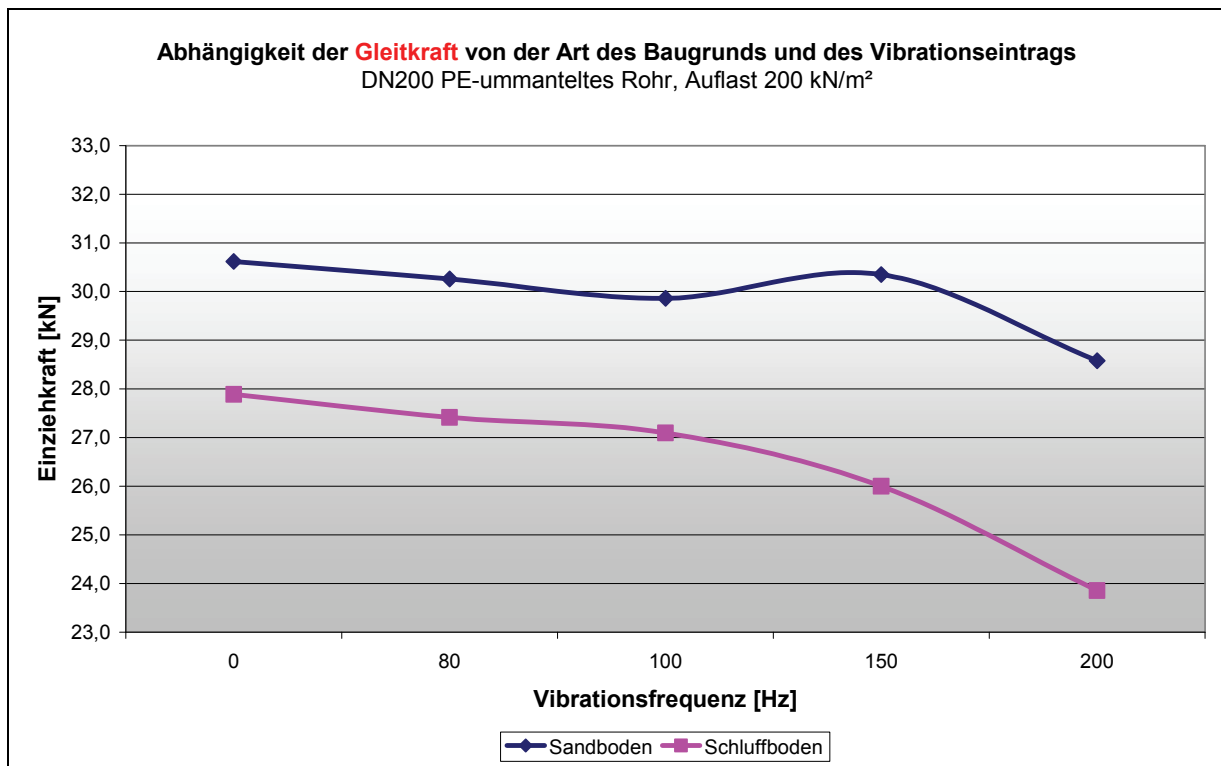


Abb. 9-17: Gegenüberstellung der Messwerte für die Gleitkraft in Abhängigkeit des Baugrunds und des Schwingungseintrags, Auflast 200 kN/m<sup>2</sup>



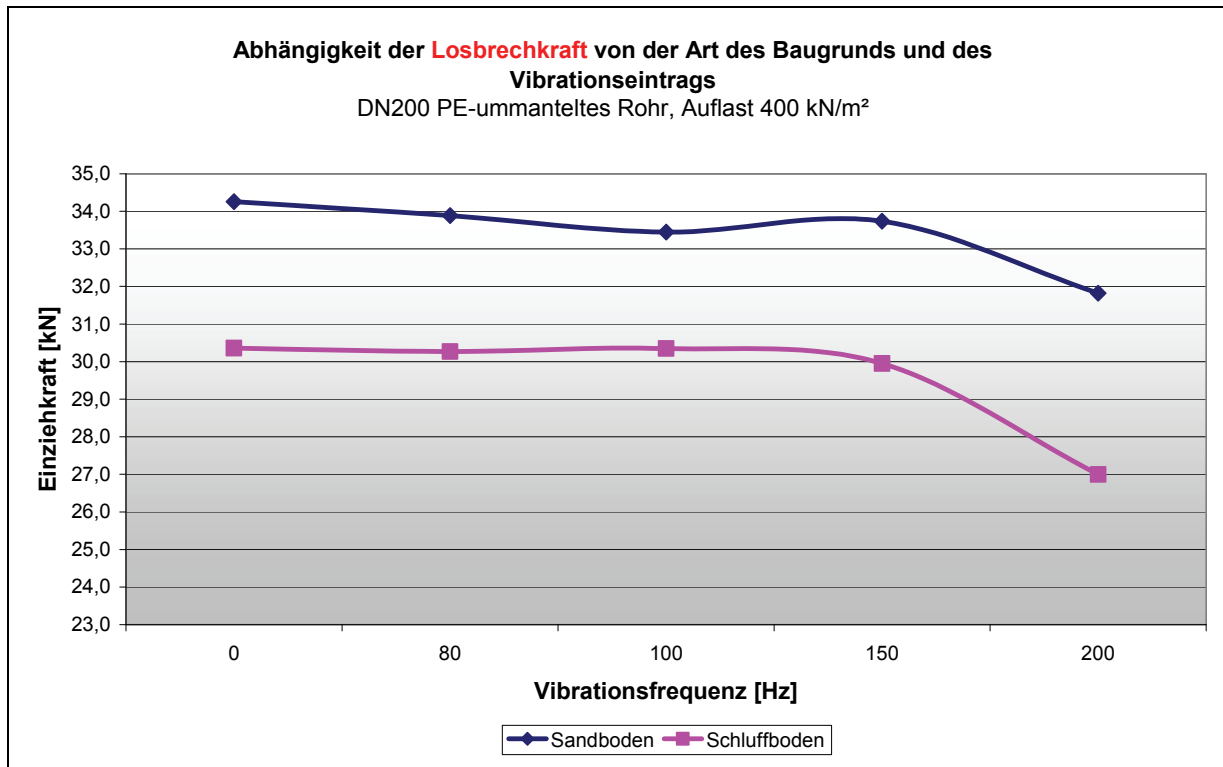


Abb. 9-18: Gegenüberstellung der Messwerte für die Losbrechkraft in Abhängigkeit des Baugrundes und des Schwingungseintrags, Auflast 400 kN/m<sup>2</sup>

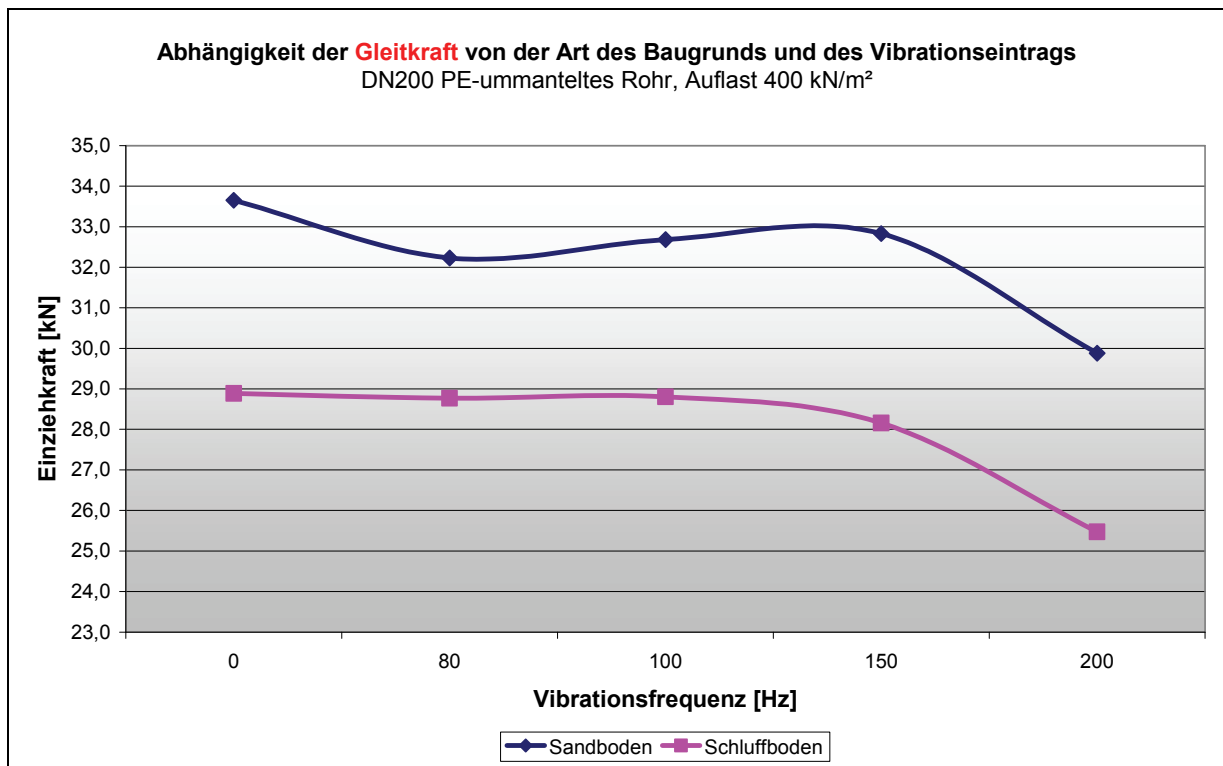


Abb. 9-19: Gegenüberstellung der Messwerte für die Gleitkraft in Abhängigkeit des Baugrundes und des Schwingungseintrags, Auflast 400 kN/m<sup>2</sup>

Wie aus den dargestellten Messwertkurven weiterhin ersichtlich, konnte im bindigen Bodenmaterial die größte Zugkraftreduzierung mit dem höchsten untersuchten Schwingungseintrag (hier 200 Hz) erreicht werden, wobei die besagten Effekte erst ab einer Frequenz  $>150$  Hz erkennbar wurden. Niedrigere Schwingungsfrequenzen führten zu keiner effektiven Zugkraftreduzierung. Ferner kann davon ausgegangen werden, dass das Maximum der möglichen Zugkraftverringerung aufgrund der begrenzten Vibratordrehzahl von maximal 200 Hz noch nicht erreicht wurde.

In den entsprechenden Versuchsreihen im Schluffboden konnte für die Losbrechkraft eine maximale Zugkraftreduzierung von ca. 20% und für die Gleitkraft von ca. 15% erreicht werden. Im Sandmaterial ergaben sich dagegen Zugkraftdifferenzen von ca. 8% für die initiale Losbrechkraft und ca. 11% für die Gleitkraft.

In den nachstehenden Abbildungen sind die maximal erreichten Zugkraftdifferenzen für die Losbrech- und Gleitkraft in den unterschiedlichen untersuchten Bodenmaterialien und für verschiedene statische Auflasten grafisch dargestellt. Hier wurde jeweils der höchste initiierte Schwingungseintrag (200 Hz), der, wie oben beschrieben, in allen Fällen zur größten Zugkraftreduzierung führte, dem jeweiligen gemessenen Zugkraftwert ohne Vibrationseintrag gegenübergestellt.

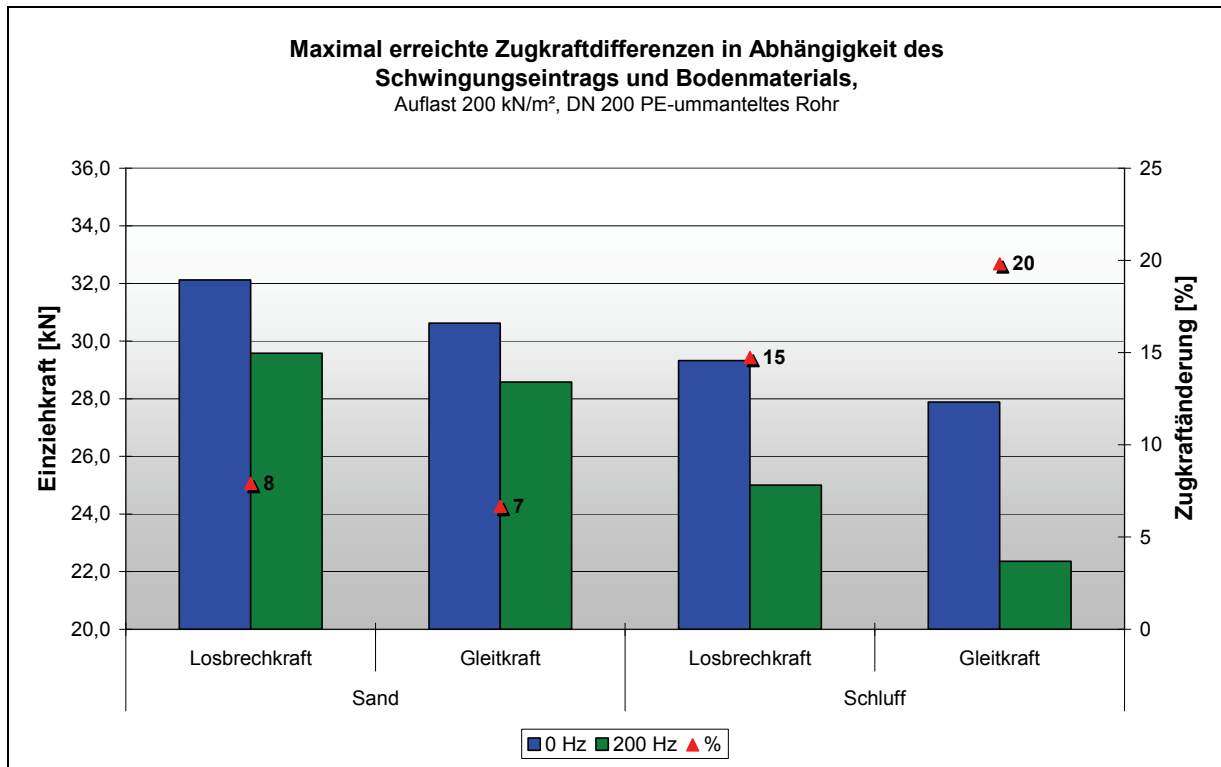


Abb. 9-20: Maximal erreichte Zugkraftdifferenzen in Abhängigkeit des Schwingungseintrags und Bodenmaterials, DN200 PE-ummanteltes Stahlrohr, Auflast 200 kN/m<sup>2</sup>

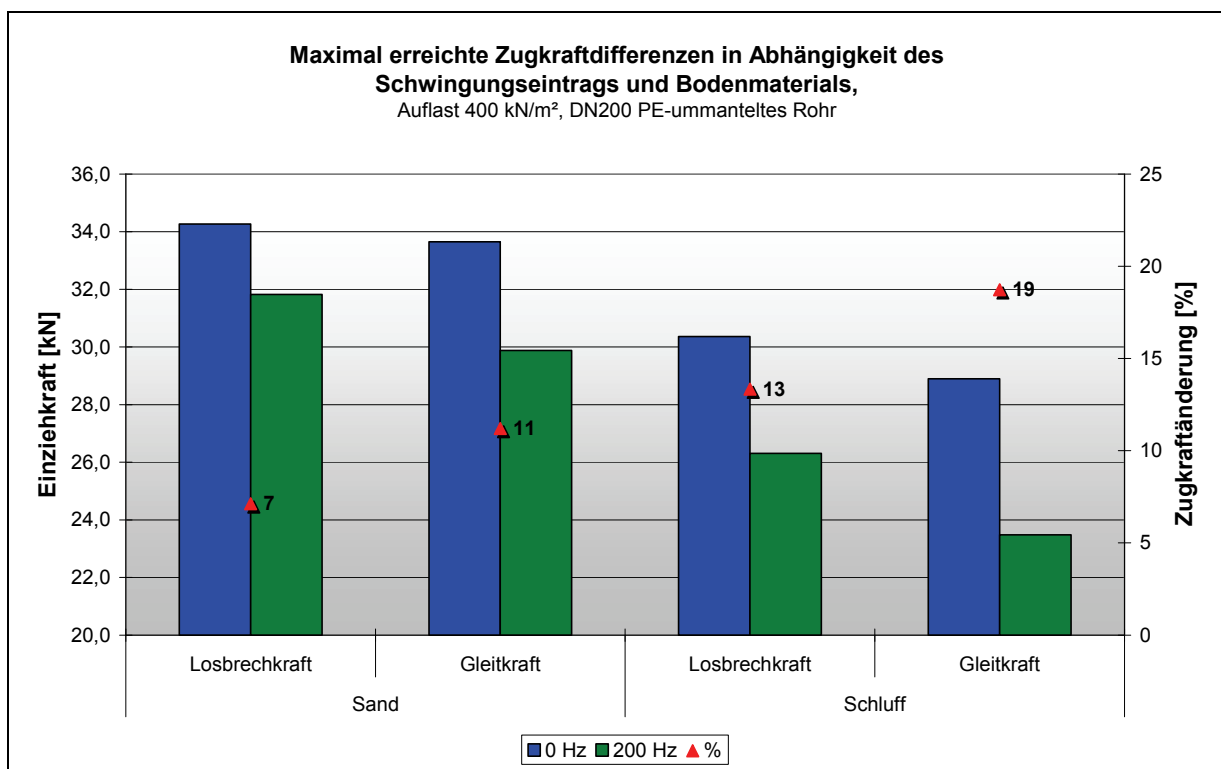


Abb. 9-21: Maximal erreichte Zugkraftdifferenzen in Abhängigkeit des Schwingungseintrags und Bodenmaterials, DN200 PE-ummanteltes Stahlrohr, Auflast 400 kN/m<sup>2</sup>

Eine Erklärung für diese Effekte liefert die Betrachtung der Bodenreaktion unter dem Einfluss von hochfrequenten Schwingungen im Baugrund. Die initiierten Vibrationen bewirken im unmittelbaren Nahbereich der Rohrmanteloberfläche eine Mobilisierung des gebundenen Porenwassers und damit eine Teilverflüssigung des Bodenmaterials. Dieser Effekt geht aufgrund der niedrigen Durchlässigkeit des Bodens mit einer Erhöhung des Porenwasserdrucks in der entsprechenden schmalen Fluidisationszone um die Rohroberfläche einher, wodurch sich die rückhaltenden Scherkräfte in entsprechender Weise verringern. Die gemessenen Werte für die Gleitkraft repräsentieren demzufolge die Restscherfestigkeit des Bodenmaterials.

Es ist anzumerken, dass im bindigen Baugrund keinesfalls eine großflächige Totalverflüssigung des umgebenden bzw. überlagernden Baugrunds auftreten bzw. erreicht werden kann.

Im Sandmaterial konnten bei der Freilegung des Testrohres im Rahmen der Umbaumaßnahmen Klassierungseffekte in Form der Konzentration von Feinkornanteilen im unmittelbaren Nahbereich der Rohroberfläche festgestellt werden (Abb. 9-22).



Abb. 9-22: Feinkornablagerungen in der Umgebung des Testrohres

Beim Ausbau des Testrohres wurden im bindigen Bodenmaterial die Verflüssigungserscheinungen infolge des Vibrationseintrags im engen Grenzbereich zwischen Rohroberfläche und Modellboden deutlich, erkennbar an der breiig-flüssigen Konsistenz des Schluffbodens im Bereich der Bohrlochoberfläche (Abb. 9-23).



Abb. 9-23: Verflüssigungserscheinungen nach Vibrationseintrag im bindigen Modellboden

### 9.8 Einfluss der Vibratorposition

Um der Fragestellung nach der optimalen Position des Schwingungsaggregates zur effektiven Zugkraftreduzierung nachzugehen, wurden ausgewählte Versuche mit dem DN100 Stahlrohr derart durchgeführt, dass insgesamt drei verschiedene Startpositionen für das Testrohr bzw. den fest installierten rohrinternen Vibrator festgelegt wurden. Diese markieren das erste Viertel, die Mitte sowie das letzte Viertel der gesamten erreichbaren Messstrecke innerhalb des Materialkastens.

Bei der Versuchsdurchführung wurde das Schwingungsaggregat jeweils 60 Sekunden vor Einziehbeginn mit einer Frequenz von 200 Hz gestartet. Die Auflast wurde auf 200 kN/m<sup>2</sup> eingestellt.



Unter der Voraussetzung konstanter Versuchsbedingungen konnte festgestellt werden, dass die geringsten Zugkraftwerte (sowohl Losbrech- als auch Gleitkraft) beim Start aus dem ersten und letzten Viertel des Materialkastens erreicht wurden, wohingegen sich beim Einziehstart aus der mittigen Position die höchste Zugkraft einstellte. Die maximale gemessene Zugkraftdifferenz in Abhängigkeit der Startposition betrug dabei lediglich für die Losbrechkraft 1,5% und für die Gleitkraft 2,2%.

Die Abb. 9-24 veranschaulicht grafisch den Zusammenhang zwischen Einziehungskraft und Vibratorposition innerhalb des Materialkastens.

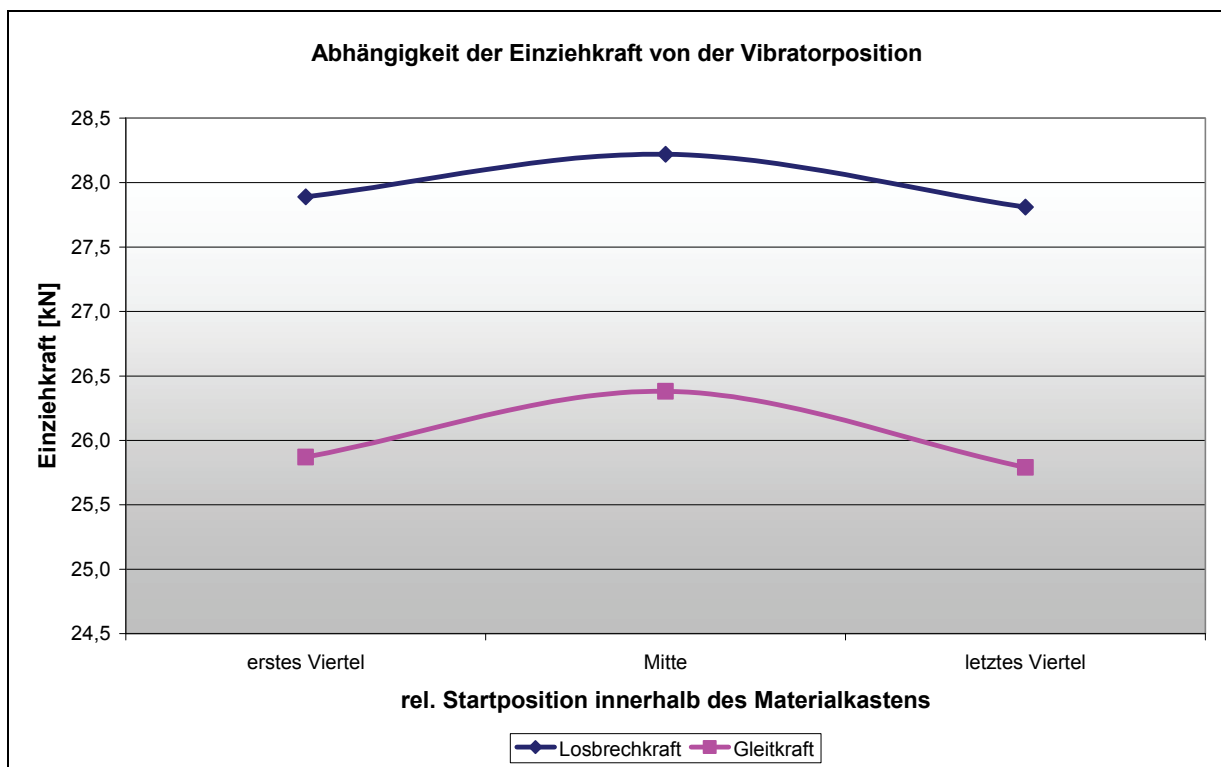


Abb. 9-24: Abhängigkeit der Einziehungskraft von der Vibratorposition innerhalb des Materialkastens

Der Effekt der Positionsabhängigkeit kann mit dem Einfluss der frei schwingenden Rohrlänge bzw. der damit zusammenhängenden Schwingungsamplitude erklärt werden. Die Höhe der Amplitude wird in erster Linie von der Zentrifugalkraft des Vibrationsaggregates bestimmt und ist abhängig von den technischen Kenngrößen Kreisfrequenz, Unwuchtmasse und Exzentrizität. Die Zentrifugalkraft ist diejenige Kraft, die das Rohr aus der Ruhelage auslenkt und in eine Biegeschwingung versetzt. Unter Berücksichtigung der Randbedingungen ist das Maß der Amplitude, welches entscheidenden Einfluss auf die Ausbildung des Porenwasserdrucks nimmt, abhängig von den Einspannverhältnissen des Rohres, die sich während des Einziehvorganges dynamisch ändern. Die Einspannung ist folglich, aufgrund der

Erkenntnisse aus den Zugversuchen, in der mittigen Position des Rohres innerhalb des Materialkastens am stärksten. Zu weiteren Einflussgrößen zählen der Angriffspunkt der durch den Vibrator erzeugten Zentrifugalkraft, die Auflastspannung, die Dämpfung sowie das Biegewiderstandsmoment des Rohres.

## 10 Zusammenfassende Bewertung der Technikumsversuche

Insgesamt verliefen die Versuchsarbeiten sehr positiv und vielversprechend im Hinblick auf die potentielle Praxiseignung des Verfahrens. Die Ergebnisse der einzelnen Versuchsreihen, die unter definierten Randbedingungen und sukzessiver Variation der auf die Zugkraft Einfluss nehmenden Größen vorgenommen wurden, bestätigten abermals den bereits in Phase I bewiesenen Ansatz, dass die Anregung des einzuziehenden Rohres durch hochfrequente Schwingungen eine effektive Zugkraftreduzierung erlaubt. Dies konnte sowohl für die initiale Losbrechkraft als auch für die konstante Zugkraft während des Rohrvortriebs nachgewiesen werden. In beiden Fällen bewirken die initiierten Schwingungen eine Herabsetzung der Reibkräfte, hervorgerufen durch bodenphysikalische Vorgänge infolge des Vibrationseintrags. Die Effekte werden dadurch erklärt, dass in einer schmalen Zone zwischen Rohroberfläche und Baugrund eine Gefügeumlagerung eintritt, die ihrerseits wiederum auf einen Anstieg des Porenwasserdrucks und der damit verbundenen Ausbildung einer (teil-)verflüssigten Bodenzone zurückzuführen ist. Im rolligen Boden resultiert aus dem Schwingungseintrag eine zyklische Aufhebung der Kontaktkräfte zwischen der Rohroberfläche und den Bodenteilchen. Daraus ergeben sich eine Reduzierung der den Boden zusammenhaltenden Scherkräfte und damit die beabsichtigte Herabsetzung der Reibkräfte bzw. der erforderlichen Zugkraft.

Zur Untersuchung der Abhängigkeit der Zugkraft von den beeinflussenden Parametern wurde eine Systematik erarbeitet, an der die Technikumsversuche orientiert wurden. Notwendige Voraussetzung für die anschließende Auswertung und Interpretation der Ergebnisse war die Schaffung gleicher Ausgangsbedingungen für die Zugversuche, wobei ein hohes Maß an Reproduzierbarkeit angestrebt wurde. Um der letztgenannten Forderung nachzukommen, wurden sämtlich Versuche mehrmals unter konstanten Vorgaben wiederholt und repräsentative Mittelwerte gebildet, die dann in die Auswertung übernommen wurden. Mitunter waren zahlreiche Vorversuche zum ‚Einfahren‘ der Versuchsanlage notwendig. Insgesamt konnte eine hohe Reproduktionsrate mit einer maximalen Toleranz von durchschnittlich 2,5% innerhalb der einzelnen Testreihen erzielt werden.

Im Rahmen der Technikumsversuche wurden vier Testrohre unterschiedlicher Dimension bzw. Oberflächenbeschaffenheit untersucht (DN100 Stahlrohr ohne Ummantelung, DN100, DN150, DN200, jeweils PE-ummantelte Stahlrohre). Alle Versuchsrohre wurden prinzipiell demselben Versuchsprogramm unterzogen; einige Parametervariationen wurden exemplarisch



für ausgewählte Versuchsbedingungen bzw. -vorgaben vorgenommen (z.B. verschiedene Modellböden, Vibratoren etc.).

Die wesentlichen Ergebnisse des versuchstechnischen Teils der Forschungsarbeiten werden im Folgenden zusammengefasst dargestellt.

Zur Schaffung von Referenzkurven für die Einziehkraft wurden in einem ersten Programm Versuche unter ausschließlicher Variation der statischen Auflast (Simulation eines Insitu-Überlagerungsdrucks) durchgeführt. Hierbei erfolgte kein Schwingungseintrag. Im Ergebnis konnte erwartungsgemäß festgestellt werden, dass sich sowohl die Losbrechkraft als auch die Gleitkraft mit zunehmender Auflast (näherungsweise linear) erhöht. Dies gilt sowohl für beide untersuchten Bodenarten als auch für die verschiedenen Rohrdimensionen und Oberflächenbeschaffenheiten. Ferner zeigt sich, dass der Differenzbetrag zwischen Losbrech- und Gleitkraft mit zunehmender Auflast größer wird. Bei den Versuchen mit dem DN100 Stahlrohr ohne PE-Ummantelung waren beim Einziehvorgang im Sandboden deutliche Lastspitzen (Slip-Stick-Effekte) zu beobachten, die sich mit Erhöhung der Auflast verstärkten. Hier erfolgte ein zyklischer Wechsel zwischen Haften und Gleiten, was eine hohe Materialbelastung, nicht zuletzt auch für die Versuchsanlage, darstellte. Ein konstanter Gleitvorgang durch Überwindung der Haftfestigkeit konnte (ohne Vibrationseinleitung) hier nicht erreicht werden. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass diese Effekte auch mit der zyklischen Dehnung und Entspannung des Zugseils verbunden sind.

Unter dem Einfluss von Schwingungen konnten generell deutliche Ergebnisse im Sinne der gewünschten Zugkraftreduktion erreicht werden. Der Großteil der Versuche wurde mit einer elektrisch betriebenen Schwingungseinheit (Betonrüttler) durchgeführt, die gewählten Frequenzbereiche waren 80, 100, 150 und 200 Hz. Die Versuchsauswertung zeigt, dass allgemein der höchste realisierte Schwingungseintrag (200 Hz) in allen Fällen zur betragsmäßig größten Reduzierung der Losbrech- und Gleitkraft führte. Dies gilt sowohl für unterschiedliche statische Auflasten als auch für die verschiedenen Rohrdimensionen. Der Mindestschwingungsenergieeintrag, der für eine effektive Zugkraftreduzierung erforderlich ist, hängt darüber hinaus von weiteren Faktoren ab, wie beispielsweise dem Überlagerungsdruck (Auflast), der Bodenbeschaffenheit und der Rohrgeometrie (Masse des schwingfähigen Gesamtsystems). Hierzu wurden separate Untersuchungen vorgenommen, die weiter unten zusammenfassend beschrieben werden.

Die besten Ergebnisse wurden im kohäsiven Baugrundmaterial (Schluff) erzielt. In den entsprechenden Versuchsreihen mit dem DN 200 PE-ummantelten Rohr konnte mittels des Schwingungseintrags für die Losbrechkraft eine maximale Zugkraftreduzierung von ca. 20% und für die Gleitkraft von ca. 15% erreicht werden. Hierfür war ein Mindestschwingungseintrag von >150 Hz erforderlich. Gekennzeichnet durch die nach unten

„offene“, abfallende Zugkraftkennlinie im Bereich der höchsten realisierten Frequenz, kann davon ausgegangen werden, dass das Maximum der möglichen Zugkraftdifferenz im Schluffboden noch nicht erreicht wurde.

Im Sandmaterial ergaben sich durchschnittliche Zugkraftreduzierungen von ca. 8% für die initiale Losbrechkraft und ca. 11% für die Gleitkraft.

Die aus dem Schwingungseintrag resultierenden Effekte im Sinne der Zugkraftreduzierung sind auf die Interaktion des Bodens mit dem schwingenden System zurückzuführen. Im Falle unzureichender Drainagebedingungen werden die eingeleiteten Kräfte zunächst nur vom Porenwasser aufgenommen. Die Vibrationen bewirken in einer schmalen Bodenzone um die Rohroberfläche einen Anstieg des Porenwasserdrucks (behinderte Drainagebedingungen, vor allem im kohäsiven Baugrund) und die Ausbildung eines dünnen, pseudoplastischen Verflüssigungsfilms. Infolge dessen werden die Scherkräfte und damit auch die Reibkräfte herabgesetzt. Ein Indiz für diese Erscheinungen wurde beim Ausbau der Versuchsrohre sichtbar. So konnten im Sandmaterial Klassierungseffekte in Form der Konzentration von Feinkornanteilen im unmittelbaren Nahbereich der Rohroberfläche festgestellt werden. Im bindigen Modellboden zeigte sich beim Freilegen des Rohres eine breiig-flüssige Konsistenz des Schluffbodens in einem engen Grenzbereich zwischen Rohroberfläche und Boden.

Mit dem DN100 Stahlrohr ohne PE-Ummantelung wurden Versuche unter Verwendung zweier Vibratoren mit unterschiedlichen Leistungen durchgeführt. Die pneumatische Erregereinheit wurde auf Basis einer Vibrationsturbine selbst gebaut und entwickelt eine Zentrifugalkraft von 3,2 kW bei einer Maximalfrequenz von ca. 120 Hz. Der elektrisch betriebene Betonrüttler, der für die vorliegende Anwendung konstruktiv modifiziert wurde, leistet ca. 1,9 kW (Zentrifugalkraft 8,5 kN) und realisiert Drehzahlen bis maximal 200 Hz. Wie sich zeigte, konnten mit der pneumatischen Vibrationszelle lediglich kleine Zugkraftdifferenzen (im gemeinsamen Frequenzbereich mit dem Betonrüttler) erzielt werden, was auf die geringe Leistung des Aggregates zurückgeführt werden kann. Die resultierende Zentrifugalkraft bzw. die Leistung wird bestimmt durch die technischen Kenngrößen Unwuchtmasse, Winkelgeschwindigkeit des Rotors und Exzentrizität. Für den Großteil der Versuche wurde ausschließlich das leistungsstärkere Aggregat verwendet.

Zur Untersuchung des Einflusses der statischen Auflast in Kombination mit dem frequenzvariablen Schwingungseintrag auf die erforderliche Einziehkraft wurden für alle drei PE-ummantelten Rohre Versuchsserien durchgeführt, in denen jeweils die statische Auflast verändert wurde (200 kN/m<sup>2</sup>, 400 kN/m<sup>2</sup>, entspr. ca. 15 bzw. 25 m Bodenüberdeckung). Da davon ausgegangen wird, dass ein gewisser Vorspannungszustand des Baugrunds für die Zugkraftreduzierung mittels Schwingungen erforderlich ist, wurde auf eine Versuchsdurchführung ohne statische Auflast in Abhängigkeit des Vibrationseintrags verzichtet. Für diesen Fall (bei lockerer Lagerung des Bodens, geringer Lagerungsdichte) kann

davon ausgegangen werden, dass das Bodenmaterial durch den Vibrationseintrag verdichtet wird, was im Hinblick auf die Zielsetzung des Forschungsprojektes vermieden werden sollte. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass unabhängig von der gewählten Auflast annähernd gleiche Effekte im Sinne der Zugkraftreduzierung auftreten. Lediglich die absoluten Zugkraftwerte liegen mit zunehmender Auflast entsprechend höher. Für das DN100 PE-ummantelte Stahlrohr ergibt sich eine prozentuale Zugkraftdifferenz in ausschließlicher Abhängigkeit der Auflast von durchschnittlich 3,8% für die Losbrechkraft und 3,0% für die Gleitkraft, für das DN150 PE-ummantelte Stahlrohr von 4,3% bzw. 3,9% und für das DN200 PE-ummantelte Rohr von 5,6% bzw. 7,1%.

Erwartungsgemäß steigt die erforderliche Zugkraft aufgrund der größeren Reibfläche und des Eigengewichts der zu installierenden Rohrleitung, neben dem Aspekt der zunehmenden Einziehlänge beim Vortrieb, mit zunehmender Rohrdimension an. Um dem Einflussparameter ‚Rohrgeometrie‘ versuchstechnisch nachzugehen, wurde eine Auswertung der erzielten Messergebnisse für die drei unterschiedlichen PE-ummantelten Stahlrohre (DN100, DN150, DN200) und eine entsprechende vergleichende Darstellung vorgenommen. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass grundsätzlich mit zunehmendem Rohrdurchmesser ein größerer (Mindest-) Schwingungseintrag (Frequenz) erforderlich ist, um eine Zugkraftverringerung herbeizuführen. Während für die Losbrechkraft beim DN100 Rohr ab einer Frequenz >100 Hz eine Kraftreduzierung erkennbar wird, die im Bereich von ca. 150 Hz ihr Maximum erreicht (gültig für 200 kN/m<sup>2</sup> Auflast), zeigen sich bei der Gleitkraft diese Effekte schon früher, d.h. ab einer Frequenz von 80 Hz und einem Maximum bei ca. 100 Hz. Eine Steigerung der Schwingungsfrequenz über diese Frequenzwerte hinaus führte zu keiner weiteren Zugkraftreduzierung. Den gleichen Trend zeigten die Messwerte für das DN150 Rohr, wobei der Mindestschwingungseintrag für die Losbrechkraftreduzierung im Bereich von ca. 100 Hz lag und sich das Zugkraftminimum bei einer Frequenz von ca. 150 Hz einstellte. Im Falle des DN200 PE-ummantelten Stahlrohres waren die höchsten Vibrationsfrequenzen zur Zugkraftreduzierung (sowohl Losbrech- als auch Gleitkraft) zu realisieren. Hier waren Frequenzen >150 Hz erforderlich, wobei kein Zugkraftminimum erreicht wurde, was darauf hindeutet, dass eine weitere Zugkraftreduzierung über den hier maximal technisch erreichten Schwingungseintrag von 200 Hz hinaus prinzipiell möglich ist.

Eine in der Praxis häufig praktizierte Methode, die Einziehkraft bei einem plötzlichen überproportionalen Anstieg der Zugkräfte herabzusetzen, ist die Verringerung der Einziehgeschwindigkeit. Im Rahmen der Versuche konnten als variable Einflussgröße zwei unterschiedliche Vortriebsgeschwindigkeiten realisiert werden (1 m/min und 0,5 m/min). Während bei den Zugversuchen, denen ausschließlich eine Betrachtung der Gleitkräfte zugrunde lag, im Sandboden mit dem DN100 Stahlrohr ohne Ummantelung lediglich eine Herabsetzung der Zugkraft um durchschnittlich 2,8% erzielt werden konnte, erbrachte die Halbierung der Einziehgeschwindigkeit bei den PE-ummantelten Rohren eine prozentuale

Zugkraftverringering von durchschnittlich 5,5% (DN100: 5,3%, DN150: 5,7%, DN200: 5,4%) im Sand. Im schluffigen Modellboden dagegen wurden im Mittel Zugkraftdifferenzen von 7,6% erreicht, der Spitzenwert lag hier unter Berücksichtigung des Schwingungseintrags bei 11,8% (bei 200 Hz). Besonders im kohäsiven Boden zeigte sich, dass der Aufbau einer aus dem Vibrationseintrag resultierenden schmalen Verflüssigungszone eine Funktion der Einwirkdauer der Schwingungen ist.

Beschichtete bzw. Kunststoff-ummantelte Rohre finden aus Gründen des Korrosionsschutzes sowie aufgrund der besseren Reibwerte in der Praxis hauptsächlich Anwendung. Die Versuchsdurchführungen im Rahmen der Forschungsarbeiten wurden daher hauptsächlich auf PE-ummantelte Stahlrohre konzentriert. Dennoch sollte der Einfluss der Rohroberflächenbeschaffenheit anhand ausgewählter Versuche untersucht werden. Hierzu wurden die durchmessergleichen DN100 Rohre verwendet (Stahloberfläche, PE-Oberfläche). Die Messergebnisse lieferten diesbezüglich eindeutige Ergebnisse. Die Auswertung der Versuche ohne Vibrationseintrag in Abhängigkeit der statischen Auflast ergab für die Gleitkraft eine durchschnittliche Zugkraftreduzierung von 4,9% bei der PE-Oberfläche im Vergleich zur Stahloberfläche. Für die Losbrechkraft wurde ein prozentualer Durchschnittswert von 13,5% errechnet. Dieses Ergebnis belegt grundsätzlich die besseren Gleiteigenschaften der PE-Ummantelung gegenüber der Stahloberfläche. Vor allem für die Losbrechkraft zeigte sich eine deutliche Herabsetzung der Haftungskräfte, die bei der Messwertaufnahme dadurch erkenntlich wurden, dass beim Anfahren der Versuchsanlage keine ausgeprägten initialen Lastspitzen, die die Überwindung der Haftreibung bzw. Scherkräfte kennzeichnen, auftraten. Ist die Haftreibung überwunden und es stellt sich Gleitreibung ein, die die Restscherfestigkeit kennzeichnet, wird der Einfluss der Rohroberflächenbeschaffenheit geringer.

Beim Versuchsrohr ohne Ummantelung waren, wie bereits erwähnt, Slip-Stick-Effekte zu beobachten. Durch den Vibrationseintrag konnten diese Wechsellasten zwischen Haften und Gleiten vermieden werden, wobei hierfür bereits ein geringer Schwingungseintrag von 80 Hz bei 0 kN/m<sup>2</sup> Auflast bzw. von 100 Hz bei den gewählten höheren Auflasten ausreichte. Bei den PE-ummantelten Rohren waren diese Erscheinungen nicht zu beobachten, der Übergang von der Haftreibung zur Gleitreibung erfolgte hier fließend und ohne Lastspitzen. Unter dem Einfluss von Schwingungen konnten auf die Rohrbeschichtung zurückzuführende Zugkraftdifferenzen von durchschnittlich 14,2% bei der Losbrechkraft und 10,2% bei der Gleitkraft ermittelt werden. Auch hier liefern die materialspezifischen Reibwerte eine Erklärung für diesen Effekt.

Um der Fragestellung nach der optimalen Position des Schwingungsaggregates innerhalb des Rohres zur effektiven Zugkraftreduzierung nachzugehen, wurden ausgewählte Versuche mit dem DN100 Stahlrohr ohne Ummantelung derart durchgeführt, dass insgesamt drei verschiedene Startpositionen für das Testrohr bzw. den fest installierten rohrinternen Vibrator

festgelegt wurden (erstes Viertel, Mitte, letztes Viertel der Messstrecke). Unter der Voraussetzung konstanter Versuchsbedingungen konnte festgestellt werden, dass die geringsten Zugkraftwerte (sowohl Losbrech- als auch Gleitkraft) beim Start aus dem ersten und letzten Viertel des Materialkastens erreicht wurden, wohingegen sich beim Einziehstart aus der mittigen Position die höchste Zugkraft einstellte. Die maximale gemessene Zugkraftdifferenz in Abhängigkeit der Startposition betrug dabei lediglich 1,5% für die Losbrechkraft und 2,2% für die Gleitkraft. Der Effekt der Positionsabhängigkeit kann mit den Einspannverhältnissen des Versuchsrohres, d.h. mit der frei schwingenden Rohrlänge und der damit zusammenhängenden Amplitudenausprägung, erklärt werden.

## **11 Materialverhalten unter Schwingungseinfluss**

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde der Fragestellung nachgegangen, welchen Einfluss die mittels eines im Rohr installierten Vibrationsaggregates initiierten Schwingungen auf die Materialeigenschaften bzw. die Festigkeit des Rohres nehmen. Hierzu wurde mittels FE-Methode ein exemplarischer Festigkeitsnachweis für den Lastfall ‚Rohrvortrieb mit Vibrationseintrag‘ durchgeführt, wobei die maximal zu erwartende Biegebelastung des Rohres und deren Einfluss auf die Betriebssicherheit rechnerisch untersucht wurden. Ferner wurde ein analytischer Berechnungsansatz hergeleitet, mit dem sich die auftretende Biegespannung infolge der Querauslenkung eines erdbetteten Rohres unter Schwingungseinfluss konservativ abschätzen lässt.

### **11.1 Berechnungsgrundlagen und Vorgaben**

Die Einleitung von Schwingungen quer zur Rohrachse mittels eines im Rohr installierten Vibrationsmoduls bedingt Querauslenkungen und damit eine dynamische Biegebelastung des Rohres, die sich mit der wirkenden Zugbelastung der Rohrvortriebskraft überlagert.

Die im Rahmen der Festigkeitsanalyse vorgenommenen Untersuchungen wurden exemplarisch für den Lastfall einer Schwingungseinleitung von 200 Hz an einem DN100 Stahlrohr vorgenommen, welches in einem Sandboden verlegt wurde.

Die Basiskennwerte und abgeleiteten Größen für die Modellrechnung sind nachstehender Tab. 11-1 zu entnehmen.

Tab. 11-1: Technische Daten und Vorgaben zur Durchführung des Festigkeitsnachweises

<b>Rohr DN100</b>	
Werkstoff	L290NB
Außendurchmesser $D_a$	114,3 mm
Wandstärke $t$	3,6 mm
Streckgrenze $K$	290 N/mm <sup>2</sup>
E-Modul (unter Normbedingungen, 20°C)	206.800 N/mm <sup>2</sup>
Verbindungsart	Stumpfnähte
Querschnittsfläche $A_R$	1.252,0 mm <sup>2</sup>
Flächenträgheitsmoment $I_R$	$I_R = \frac{\pi}{64} \cdot D_a^4 \cdot \left(1 - \left(\frac{d_i}{d_a}\right)^4\right) = 1.919,8 \cdot 10^3 \text{ mm}^4$
Widerstandsmoment $W_R$	$W_R = \frac{\pi}{32} \cdot D_a^3 \cdot \left(1 - \left(\frac{d_i}{d_a}\right)^4\right) = 33.572,9 \text{ mm}^3$
<b>Bodenmaterial</b>	
E-Modul Boden (Sand, dicht, rundkörnig)	80 - 130 MN/m <sup>2</sup>
Bettungsmodul $k_v$	0,07 - 0,14 N/mm <sup>3</sup>
<b>Vibrationsaggregat, Versuchsanlage</b>	
Vibratortyp	Elektro-Betonrüttler, NetterVibration, Typ NCZ 660
Flaschendurchmesser $d_R$	66 mm
Flaschenlänge $l_R$	510 mm
Flaschengewicht $m_R$	11,4 kg
Nennfrequenz $f_{n,R}$	200 Hz
Unwuchtmasse $m_e$	0,18 kg
Exzentrizität $e$	30 mm
Zugkraft $F_{\text{axial}}$	2.500 N
Max. Zentrifugalkraft $F_z$	8.500 N
Winkelgeschwindigkeit $\omega$	$\omega = 2\pi \cdot f = 1.256,64 \text{ s}^{-1}$

## 11.2 Modellrechnung

### 11.2.1 Abschätzung der Querauslenkung des Rohres

#### THEORETISCHE, MAXIMALE QUER AUSLENKUNG DES ROHRES

Zur rechnerischen Abschätzung der Querauslenkung  $Y_b$  des Rohres wird zunächst die maximal mögliche Querauslenkung des gesamten Massensystems, also unter Berücksichtigung aller beteiligten Massen, berechnet. In die ruhende Masse geht auch das durch die Auslenkung bewegte Rohr ein ( $m_{\text{Rohr}} = 9,81 \text{ kg/m}$ ). Hierbei wird die konservative Annahme getroffen, dass die Rohrlänge  $l_{\text{Rohr}}$  der Flaschenlänge des Vibrators  $l_R$  entspricht. Daraus ergibt sich für das Gesamtmassesystem  $M$ :

$$\begin{aligned} M &= m_R + m_{\text{Rohr}} \cdot l_{\text{Rohr}} - m_e \\ (11.1) \quad &= 11,4 \text{ kg} + 9,81 \text{ kg/m} \cdot 0,51 \text{ m} - 0,18 \text{ kg} \\ &M \approx 16,2 \text{ kg} \end{aligned}$$

Damit errechnet sich die maximale Schwerpunktauslenkung  $e_s$  zu:

$$(11.2) \quad e_s = Y_b = \frac{m_e}{M} \cdot e = 0,334 \text{ mm}$$

Da der Widerstand des Bodens, der der Auslenkung des Rohres entgegen wirkt, in diesem Ansatz keine Berücksichtigung findet, stellt die o.g. Auslenkung die maximale Obergrenze dar. Die äußeren Kräfte sind in diesem Fall gleich Null, so dass sich das System im Massenkräftegleichgewicht befindet. Erst in dem Maße, wie der Bodenwiderstand die dynamische Querauslenkung des Rohres unterdrückt, wird eine äußere Reaktionskraft auf das umgebende Bodenmaterial generiert.

Die maximale äußere Kraft, die aus der Schwingungseinleitung des Vibrators resultiert ( $F_z = 8.500 \text{ N}$ ), stellt sich lediglich bei einer vollständigen Unterdrückung der Querauslenkung ein. In Abhängigkeit der Steifigkeit des Baugrunds resultiert daraus, dass die reale Querauslenkung  $Y_b$  in einer Bandbreite zwischen 0 und 0,334 mm liegt.

#### REALISTISCHE ABSCHÄTZUNG DER QUER AUSLENKUNG DES ROHRES

Eine realistischere Abschätzung der Querauslenkung des erdbetteten Rohres ergibt sich unter Berücksichtigung der Bodenreaktion.

Bei einer druckbelasteten Rohroberfläche  $A_p = 114,3 \text{ mm} \times 510 \text{ mm} = 58.293,0 \text{ mm}^2$  entspricht dies bei voller Querkrafteinleitung  $F_z$  einem Bodendruck  $P_B$  von

---



$$(11.3) \quad P_B = \frac{F_z}{A_p} = 0,1458 \text{ N/mm}^2$$

und einem Steifemodul  $E_s$  von

$$(11.4) \quad E_s = \frac{P_B}{Y_b} = 0,4378 \text{ N/mm}^2/\text{mm} \quad \text{bzw.} \quad E_s = 437,8 \text{ MN/m}^2.$$

Unter den oben aufgeführten Annahmen ist daher der berechnete Steifemodul offensichtlich zu groß, da die angesetzte Querkraft nicht in vollem Umfang wirksam ist. Unter Zugrundelegung eines der Bodenart entsprechenden Steifemoduls  $E_s = 80 \text{ MN/m}^2$  (Sand, dicht, rundkörnig) müsste bei gleicher Querauslenkung eine entsprechend kleinere Kraft eingeführt werden.

Zur Abschätzung der Größenordnung der zu erwartenden Querauslenkung sowie der Reaktionskraft des Rohres auf den Boden wird der Vorgang der Querauslenkung infolge der Massenbeschleunigung als lineares Gesetz betrachtet. Demgemäß kann der Zusammenhang zwischen der Kraft und Verschiebung des Vibrationsaggregates und dem Rohrelement wie folgt vereinfacht dargestellt werden:

Massereaktionskraft auf den Boden

$$F_M = F_z - C_M \cdot Y_b$$

Äquivalente Massensteifigkeit

$$C_M = \frac{F_z}{Y_{b,\max}} = 25.525,5 \text{ N/mm}$$

Steifemodul des Bodens

$$E_s = 80 \text{ N/mm}^2$$

Druckfläche

$$A_p = 114,3 \text{ mm} \cdot 510 \text{ mm} = 58.293 \text{ mm}^2$$

Steifigkeit

$$C_B = \frac{E_s \cdot A_p}{1000} = 4.663,4 \text{ N/mm}$$

Bodenreaktionskraft

$$F_B = C_B \cdot Y_b \quad (\text{linearer Ansatz})$$

**Reale Bedingung**

$$F_M = F_B$$

$$F_z - C_M \cdot Y_b = C_B \cdot Y_b \quad \Rightarrow$$

**Querauslenkung**

$$Y_b = \frac{F_z}{(C_M + C_B)} = 0,282 \text{ mm}$$

**Resultierende Kraft zwischen Boden und Rohr**

$$F_R = C_B \cdot Y_b = 1.315 \text{ N}$$

### 11.2.2 Berechnung der Biegespannung infolge der Querauslenkung

Für den rechnerischen Nachweis der Biegebeanspruchung des Rohres infolge der Querauslenkung durch die eingeleiteten Vibrationen wurde der Fall eines erdbetteten Rohres mittels der FE-Methode simuliert. Unter Ausnutzung von Symmetriebedingungen wurde lediglich ein halbes Modell generiert.

Die wirkende Kraft wurde konservativ als Knotenlast  $N_{Ktn} = 330 \text{ N/Ktn}$  (für  $l/2 = 260 \text{ mm}$ , halbe Flaschenlänge) eingegeben, um die maximal mögliche Querauslenkung  $Y_b$  von  $0,334 \text{ mm}$  zu erreichen. Die Berechnung wurde unter Zugrundelegung der Werte

- Steifemodul  $E_s = 80 \text{ MN/m}^2$  (Sand, körnig, rund),
- Bodensteifigkeit  $C_{FE} = 4663,4 \text{ N/mm} / 510 \text{ mm} = 9,14 \text{ N/mm/mm}$  und
- reduzierte Querkraft  $F_z' = 3960 \text{ N}$

durchgeführt.

Die nachstehenden Abbildungen zeigen das grafische Ergebnis der FE-Simulation für den betrachteten Lastfall. In Abb. 11-1 ist die Biegespannungsverteilung, in Abb. 11-2 die Deformation bzw. Biegevergleichsspannung nach dem Ansatz von VON MISES dargestellt.

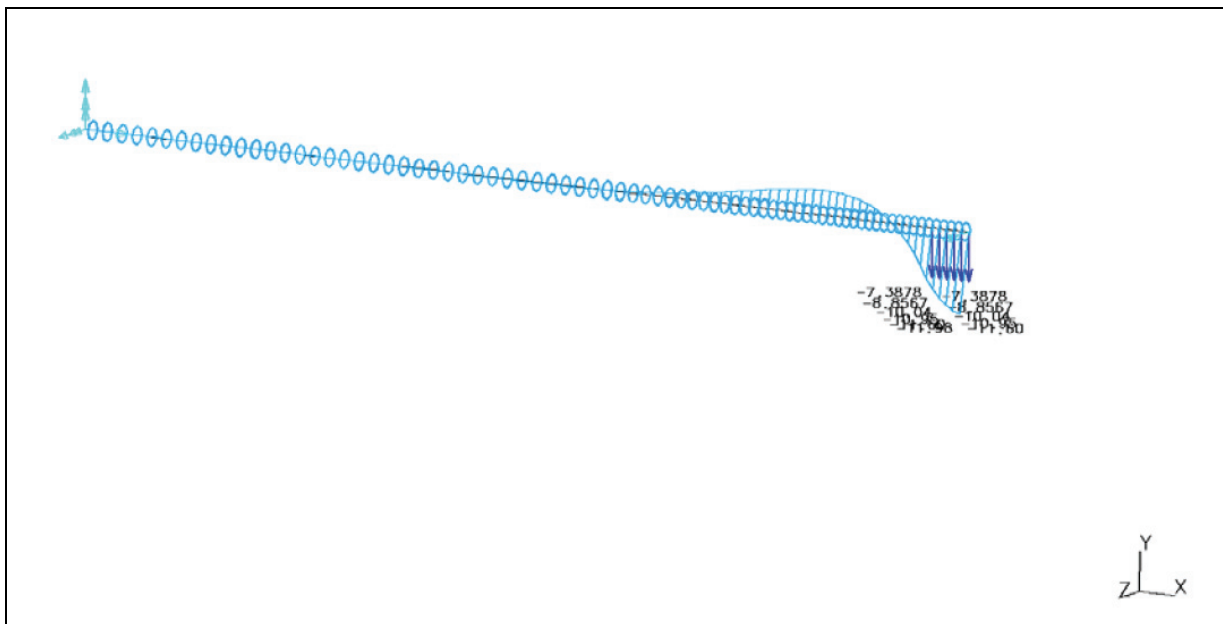


Abb. 11-1: Biegespannungsverteilung als Ergebnis der FE-Modellierung für den betrachteten Lastfall

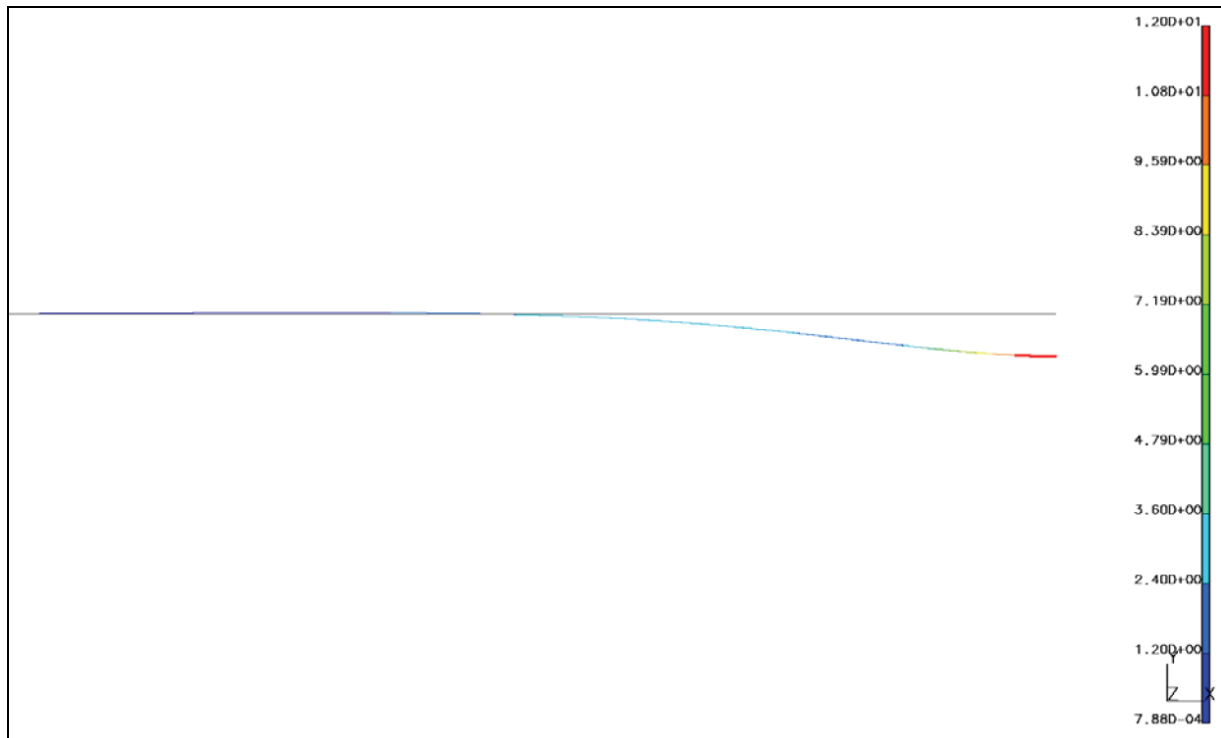


Abb. 11-2: Biegevergleichsspannung (von Mises) und Deformation für den betrachteten Lastfall

Es sei angemerkt, dass die Kraft  $F_z'$  durch die angrenzenden Rohrlängen größer ist als bei der reinen linearen Berechnung. Die reale Querauslenkung ist deutlich kleiner.

### 11.3 Ergebnis der Festigkeitsanalyse

Die Berechnungen im Rahmen der Festigkeitsanalyse für den Lastfall ‚Rohrvortrieb mit Vibrationseintrag‘ ergaben, dass unter Zugrundelegung eines Steifemoduls des betrachteten Sandbodens von  $80 \text{ MN/m}^2$  eine maximale Querauslenkung des Rohres von  $0,334 \text{ mm}$  auftritt.

Trotz der zu groß angenommenen Werte für die Querauslenkung wurde mit Spannungen bis maximal  $12,0 \text{ N/mm}^2$  ein sehr niedriges Spannungsniveau ermittelt, das erheblich unterhalb der Werkstoffstreckgrenze ( $290 \text{ N/mm}^2$ ) liegt. Aus der Zugkraft für den Rohrvortrieb resultiert eine Materialbeanspruchung von lediglich  $2 \text{ N/mm}^2$ . Das errechnete Lastniveau ist damit insgesamt sehr gering und - für den hier untersuchten Fall - nicht geeignet, eine Schädigung des Rohrmaterials zu verursachen.

Für den Fall einer großtechnischen Schwingungsapplikation bei der grabenlosen Rohrverlegung und unter Insitu-Bedingungen sollte für den konkreten Fall und unter realistischen Randbedingungen eine rechnerische Überprüfung vorgenommen werden. Dies gilt insbesondere für den Einsatz ggf. erforderlicher leistungstärkerer Vibrationsaggregate.

## 11.4 Ableitung eines analytischen Berechnungsansatzes

Zur überschlägigen Berechnung der aus der vibrationsbedingten Querauslenkung von erdbebetten Rohren resultierenden Biegespannung wird im Folgenden ein analytischer Ansatz vorgestellt, mit dem sich die Materialbeanspruchung schnell und konservativ abschätzen lässt.

Für die Ermittlung der Biegespannung und der Durchbiegung bei beliebigen Bodenarten und/oder anderen Rohrdurchmessern bzw. Schwingungsaggregaten wird der analytische Ansatz des ‚beidseitig fest eingespannten Balkens mit mittig angreifender Punktlast‘ (bei  $L_s/2$ ) gewählt (Abb. 11-3).

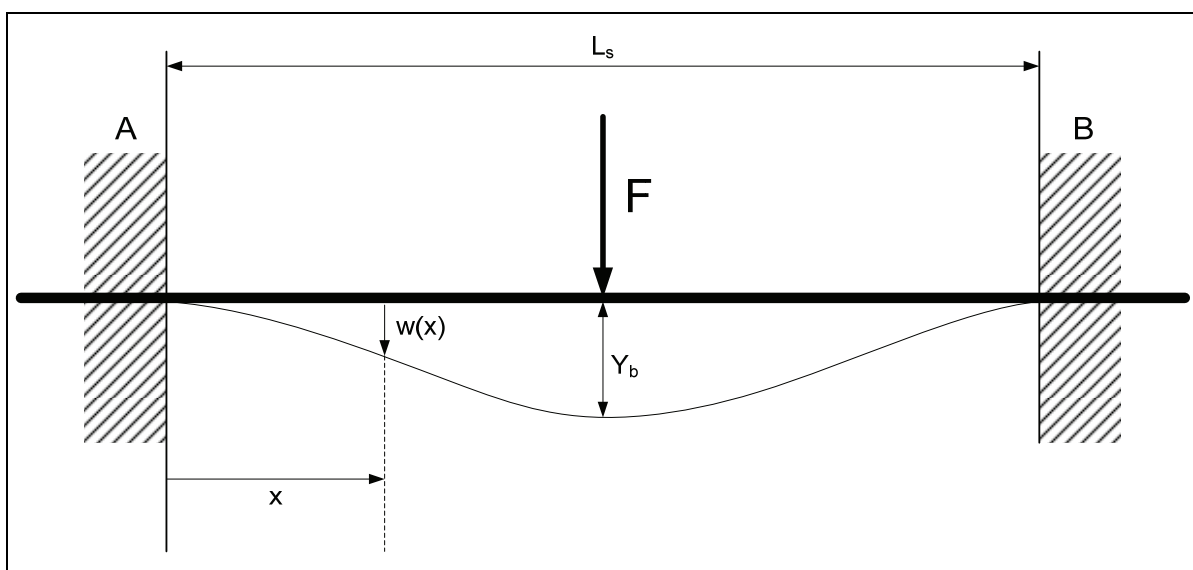


Abb. 11-3: Beidseitig eingespannter Biegebalken mit Punktlast, Modelldarstellung [8]

Die maximal zu erwartende Querauslenkung wird gemäß der unter Punkt 11.2.1 aufgeführten Rechenschritte auf Basis des E-Moduls für die Bodenart Sand (körnig, rund) zu  $Y_b = 0,334$  mm berechnet.

Nach DIN EN 1594 Anhang B kann die wirksame Biegelänge  $L_s$  in mm, die aus der Krafteinleitung des Vibrators resultiert, unter Verwendung des folgenden Ansatzes ermittelt werden:

$$(11.5) \quad L_S = f_m \cdot \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E_R \cdot I_R}{D_a \cdot k_v}} = f_m \cdot \sqrt[4]{\frac{40 \cdot E_R \cdot I_R}{E_B}} \quad [\text{mm}]$$

mit

$f_m$  = Durchbiegung [mm] (Herleitung unter Zugrundelegung des Biegeradius der HDD-Bohrung)

$E_R$  = Verformungsmodul des Rohrwerkstoffs [N/mm<sup>2</sup>]

$I_R$  = Trägheitsmoment der Rohrleitung [mm<sup>4</sup>]

$D_a$  = Rohraußendurchmesser [mm]

$k_v$  = vertikaler Bettungsmodul [N/mm<sup>3</sup>]

$E_B$  = Verformungsmodul des Baugrunds [N/mm<sup>2</sup>]

Unter Zugrundelegung der Grenzwerte für die E-Module des Bodens ( $E_{B1} = 80 \text{ MN/m}^2$  und  $E_{B2} = 130 \text{ MN/m}^2$ ), deren entsprechenden Bettungsmodule ( $k_{v1} = 0,07 \text{ N/mm}^3$  und  $k_{v2} = 0,114 \text{ N/mm}^3$ ) sowie eines aus der FE-Berechnung abgeleiteten Wertes von  $f_m = 4$  errechnet sich die wirksame Bieglänge zu  $L_{S1} = 2667,3 \text{ mm}$  bzw.  $L_{S2} = 2361,1 \text{ mm}$ . Auf Basis dieser Kenntnis kann die wirksame Biegespannung  $\sigma_{b,s}$  innerhalb des Rohrwerkstoffs gemäß der Formel

$$(11.6) \quad \sigma_{bs} = 12 \cdot Y_b \cdot E_R \cdot \frac{D_a}{L_S^2} \quad [N/mm^2]$$

berechnet werden. Für die oben angesetzten Eckwerte ergibt sich eine Biegespannung  $\sigma_{b,s}$  im Bereich von 13,3 - 16,9 N/mm<sup>2</sup>.

## 12 Übertragbarkeit in die Praxis

### 12.1 Berechnungsansätze

Die im Folgenden Kapitel vorgestellten Rechenmodelle sollen dazu dienen, Lösungsansätze für die großtechnische Umsetzung der Schwingungsapplikation beim HDD aufzuzeigen. Generell muss angemerkt werden, dass eine direkte Übertragung der im Technikumsmaßstab erzielten Resultate, d.h. unter den hier vorliegenden Rahmenbedingungen, nicht empfohlen werden kann. Prinzipiell konnte die Eignung des ‚Vibrationsverfahrens‘ durch die Forschungsarbeiten bewiesen werden. Die realen Insitu-Bedingungen stellen jedoch andere Vorgaben bzw. Randparameter dar, die es bei einer potentiellen Feldanwendung unbedingt zu berücksichtigen gilt.

#### 12.1.1 Konventionelle Abschätzung des Reibungswiderstandes und der erforderlichen Zugkraft

Zur Abschätzung der wirksamen Reibungskräfte bzw. der Mantelreibung beim grabenlosen Rohrvortrieb wurden von zahlreichen Autoren Berechnungsansätze ermittelt, die STEIN (2003) in seinem Buch ‚Grabenloser Leitungsbau‘ aufführt. Ferner sind umfangreiche Tabellenverzeichnisse verfügbar, aus denen die größtenteils auf empirischen Erkenntnissen beruhenden Werte für die Mantelreibung in Abhängigkeit der Rohroberflächenbeschaffenheit sowie der Art des Baugrundes entnommen werden können. Die rechnerische Bestimmung der erforderlichen Einziehkraft beim HDD-Rohrvortrieb erfolgt zurzeit hauptsächlich gemäß der niederländischen Norm NEN 3651 sowie auf Basis der AGA-Methode der American Gas Association. Einige grundlegende Berechnungsansätze seien im Folgenden vorgestellt.

Die gesamte erforderliche Zugkraft  $F$ , die zum Einziehen einer Rohrleitung vom Bohrgerät aufgebracht werden muss, wird im Wesentlichen durch drei zu berücksichtigende Einzelkräfte bestimmt. Diese sind

- Reibungskraft auf den Rollenböcken ( $F_1$ ),
- Reibungskraft infolge des Kontaktes zwischen Rohrleitung und Baugrund ( $F_2$ ) sowie
- Reibungskraft zwischen Rohrleitung und Bohrspülung ( $F_3$ ).

Die Gesamtzugkraft  $F$  ergibt sich durch die Summenbildung der Einzelkraftkomponenten  $F_1$  bis  $F_3$ .

Die folgenden Ausführungen beschränken sich auf die Betrachtung der Reibungsverhältnisse der im Bohrkanal befindlichen Rohrleitung, wobei die Reibungskräfte in der Regel abschnittsweise für bestimmte Bohrlochsektionen (gerade (A-B, E-F) und gekrümmte (B-C, D-E) Abschnitte, s. Abb. 12-1) einzeln ermittelt und im Anschluss summarisch zusammengeführt werden. Die größte Zugkraft tritt normalerweise am Ende des Einziehvorganges auf, wobei erfahrungsgemäß ein näherungsweise linearer Zugkraftanstieg während des Installationsvorganges zu verzeichnen ist.

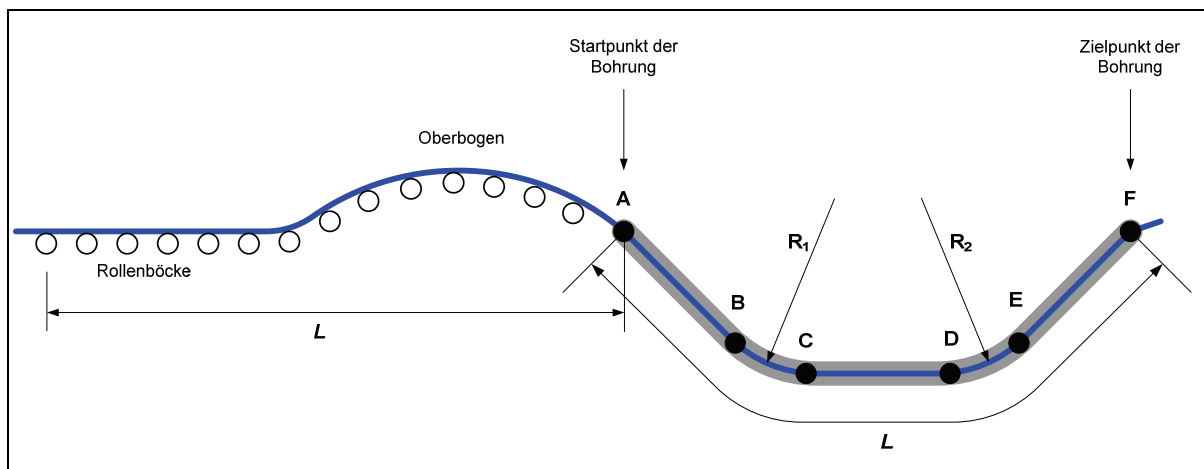


Abb. 12-1: Schematische Darstellung von Bohrlochabschnitten zur Zugkraftabschätzung

Die Abschätzung der Reibungskraft bzw. Zugkraft  $F_2$ , die aus der Reibung zwischen Rohrleitung und Bohrlochwand resultiert, kann gemäß folgender Faustformel ermittelt werden:

$$(12.1) \quad F_2 = L \cdot \mu_2 \cdot g \cdot \left| \left( \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_R^2 \cdot (\rho_{Sp} - G_R) \right) \right| \quad [kN]$$

darin sind

$L$  = Bohrungslänge [m]

$\mu_2$  = Reibbeiwert (ca. 0,1 bis 0,3) [-]

$g$  = Erdbeschleunigung [ $m/s^2$ ]

$d_R$  = Durchmesser der Rohrleitung [m]

$\rho_{Sp}$  = Dichte der Bohrspülung [ $kg/m^3$ ]

$G_R$  = Metergewicht der Rohrleitung [ $kg/m$ ]

Die Zugkraftkomponente  $F_3$ , die aus der Reibung zwischen Rohrleitung und Bohrspülung resultiert, kann über die nachstehende Formel abgeschätzt werden. Darin wird für die auftretende Reibung ein dimensionsbehafteter spezifischer Reibwert  $\mu_3$  in  $\text{N/m}^2$  Rohroberfläche angesetzt, dessen Wert erfahrungsgemäß bei ca. 100 bis 350  $\text{N/m}^2$  liegt.

$$(12.2) \quad F_3 = L \cdot \mu_3 \cdot \pi \cdot d_R \quad [\text{kN}]$$

Im einfachsten Fall wird bei der abschnittswisen Berechnung der Reibungswiderstände von einer geradlinigen Linienführung des Rohrvortriebs ausgegangen, wobei zwischen Reibungswiderstand und Vortriebslänge eine lineare Abhängigkeit vorausgesetzt wird. Der Reibungswiderstand  $R$  ergibt sich demnach aus der Integration der Mantelreibung  $M$  über die relevante Rohroberfläche gemäß der Gleichung

$$(12.3) \quad R = M \cdot l_u \cdot L = M \cdot d_a \cdot \pi \cdot L \quad [\text{kN}]$$

mit

$R$  = Reibungswiderstand [kN]

$M$  = Mantelreibung [ $\text{kN/m}^2$ ]

$l_u$  = Umfangslänge (=  $d_a \cdot \pi$  für Kreisquerschnitt)

$L$  = Vortriebslänge [m]

In Analogie zur technischen Mechanik (Coulomb'sches Reibungsgesetz) errechnet sich die Mantelreibung  $M$  zu

$$(12.4) \quad M = \mu \cdot p_r \quad [\text{kN} / \text{m}^2]$$

mit

$\mu$  = Reibbeiwert [-]

$p_r$  = radiale Belastung der äußeren Rohrmantelfläche [ $\text{kN/m}^2$ ]

Der Reibbeiwert ist eine Funktion des Wandreibungswinkels  $\delta$  und kann wie folgt berechnet werden:



$$(12.5) \quad \mu = \tan \delta$$

Bei der Berechnung muss der Bewegungszustand des einzuziehenden Rohres berücksichtigt werden und dementsprechend für den Reibbeiwert  $\mu$  entweder die Gleitreibung  $\mu_G$  oder die Haftreibung  $\mu_H$  angesetzt werden. Vor allem bei Unterbrechungen des Einziehvorgangs kann es, bedingt durch die Überwindung der Haftreibung beim Wiederauffahren, insbesondere bei adhäsiven oder stark zum Quellen neigenden Böden, zu erheblichen Lastspitzen kommen, die im ungünstigsten Fall zum Festsitzen des Rohrstranges führen können. Aus diesem Grund ist die Haftreibung bei der Abschätzung der erforderlichen Einziehkraft anzusetzen.

Generell bewegen sich die Werte für den Reibbeiwert  $\mu$  in einer Größenordnung von ca. 0,2 bis 0,8, bei Verwendung einer Bentonit-Bohrspülung zwischen ca. 0,1 und 0,3. Richt- bzw. Erfahrungswerte für den Reibwert in Abhängigkeit der Rohrmantelbeschaffenheit, des Bewegungszustandes sowie der Art des Baugrundes können entsprechenden Tabellenwerken entnommen werden, z.B. aus STEIN (2003).

Zu berücksichtigen ist ferner, dass die vom Spülungsmedium umgebenen Vortriebsrohre Auftriebskräfte erfahren können, was dazu führt, dass die Kontaktkraft zwischen Rohr und Bohrlochfirste stark ansteigt. Diese Effekte treten vor allem bei großkalibrigen Rohrleitungen auf. Hierdurch erhöhen sich infolge dessen die Reibungskräfte und in adäquater Weise die erforderliche Zugkraft. Ferner ist zu bedenken, dass es aufgrund der zirkulierenden Bohrspülung zu Auswaschungen in der Bohrlochwand kommt, mit dem Effekt, dass die raue Bohrkanalbeschaffenheit die Reibwerte zusätzlich negativ beeinflusst. In diesen Fällen sind geeignete Gegenmaßnahmen zu treffen, wie beispielsweise die Ballastierung des Produktrohrs beim Einziehvorgang. Generell ist also zu erwarten, dass die in der Praxis auftretenden Einziehkraften noch um einiges höher liegen als die auf Basis der oben vorgestellten rechnerisch ermittelten.

Ein weiterer Ansatz zur Auswahl der geeigneten Bohrgerätegröße wurde von LÜBBERS & KÖGLER (2001), basierend auf empirischen Untersuchungen und Praxiserfahrungen, entwickelt. Dieser Ansatz wurde bereits in Kapitel 2.5 vorgestellt [38].

### 12.1.2 Berücksichtigung des Vibrationseintrags

Die Erkenntnisse aus den Technikumsversuchen zeigen, dass die Applikation gezielt eingeleiteter, hochfrequenter Schwingungen in die zu installierende Rohrleitung eine effektive und nachhaltige Reduzierung der Einziehkraft erlaubt, sofern die Vibrationseinleitung kontinuierlich und ohne Unterbrechung aufrecht erhalten wird. Dabei treten die Effekte unmittelbar nach dem Hochfahren der Vibrationszelle auf die Betriebsfrequenz auf und sind damit unabhängig von der Einwirkdauer vor Einziehbeginn.

Generell kann davon ausgegangen werden, dass ein hoher Schwingungsenergieeintrag bzw. eine hohe Schwingungsfrequenz, die in jedem Fall über der Resonanzfrequenz des Baugrunds liegen muss, zur größtmöglichen Reib- bzw. Zugkraftverringerung führt.

Im Rahmen einiger Versuche wurden teilweise Zugkraftdifferenzen von über 20% als reiner Effekt des Schwingungseintrags gemessen. Eine zusätzliche Reduzierung der Einziehggeschwindigkeit erlaubt eine weitere Zugkraftverringerung (ca. 12% im bindigen Baugrund).

Bei der Projektierung eines HDD-Projektes bzw. der Dimensionierung der Bohranlage kann, unter der Voraussetzung der Verfügbarkeit einer geeigneten Schwingungsapparatur, davon ausgegangen werden, dass mittels des Schwingungseintrags eine Zugkraftreduzierung in den genannten Größenordnungen erreichbar ist.

### 12.1.3 Mechanisches Ersatzmodell

Die Forderung nach einer möglichst genauen Abbildung des Realsystems mit dem Ziel der mathematisch-physikalischen Erfassung der beeinflussenden Größen stellt sich mitunter als sehr schwierig dar. Es wurden in der Vergangenheit diverse analytische Modellansätze entwickelt, die die Interaktion von Schwingungen und Baugrund beschreiben, zumeist im Zusammenhang mit Bodenverbesserungsverfahren. Diese Modelle sind näherungsweise bzw. durch die Implementierung bestimmter Anpassungen auf die vorliegende Problemstellung übertragbar und liefern eine Basis für die modellhafte Beschreibung der Vibrationswirkungen beim HDD.

Grundsätzlich ist die Bewegung eines Vibrationsaggregates im Baugrund von den geomechanischen Eigenschaften des Bodens abhängig, da dieser die Rotationsdynamik des Schwingers durch Dämpfung beeinflusst. Die Modellbildung beruht auf der idealisierten Reduzierung des Gesamtsystems bzw. der Einflussgrößen auf sog. Feder-Dämpfer-Elemente. Die Steifigkeit des Bodenmaterials wird dabei durch die Federsteifigkeit  $k$ , die Material- bzw. Gesamtdämpfung durch den Dämpfungskoeffizienten  $c$  repräsentiert. Das Schwingungsaggregat wird gemäß der idealisierten Vorstellung als sog. Einmassenschwinger beschrieben. Der Schwingfall, der diesen Betrachtungen zugrunde liegt, ist die erzwungene, gedämpfte, harmonische Schwingung.

Das Schwingungsaggregat wird im vorliegenden Fall als ebenes Pendel betrachtet und in eine Schnittebene projiziert. Bei Betrachtung einer Momentaufnahme des Rotationsvorgangs wird deutlich, dass der Schwinger keinen umseitigen Kontakt zum umgebenden Bodenmaterial hat, sondern einseitig in Richtung der resultierenden Zentrifugalkraft in die Bohrlochwand hineingedrückt wird und dort den Boden verdrängt bzw. verdichtet. Auf der gegenüberliegenden Seite entsteht gleichzeitig ein Freiraum zwischen Rüttleroberfläche und

Bohrlochwand. Bei ausreichend hoher Frequenz (jenseits der Resonanzfrequenz des Bodens) sowie entsprechend geringer Schwingungsamplituden kann die Gefahr von Verdichtungseffekten durch Nachfließen von Material in den Freiraum (Spalt) minimiert werden.

Das Vibrationsaggregat beschreibt in guter Näherung eine Kreisbahn. Dabei läuft die Unwuchtmasse  $m_U$  der Bewegung des Rüttlers  $m_R$  um den Winkel  $\varphi$  voraus. Unter der weiteren Voraussetzung viskoser Dämpfung besitzt das in Abb. 12-2 (rechts) dargestellte Ersatzmodell Gültigkeit.

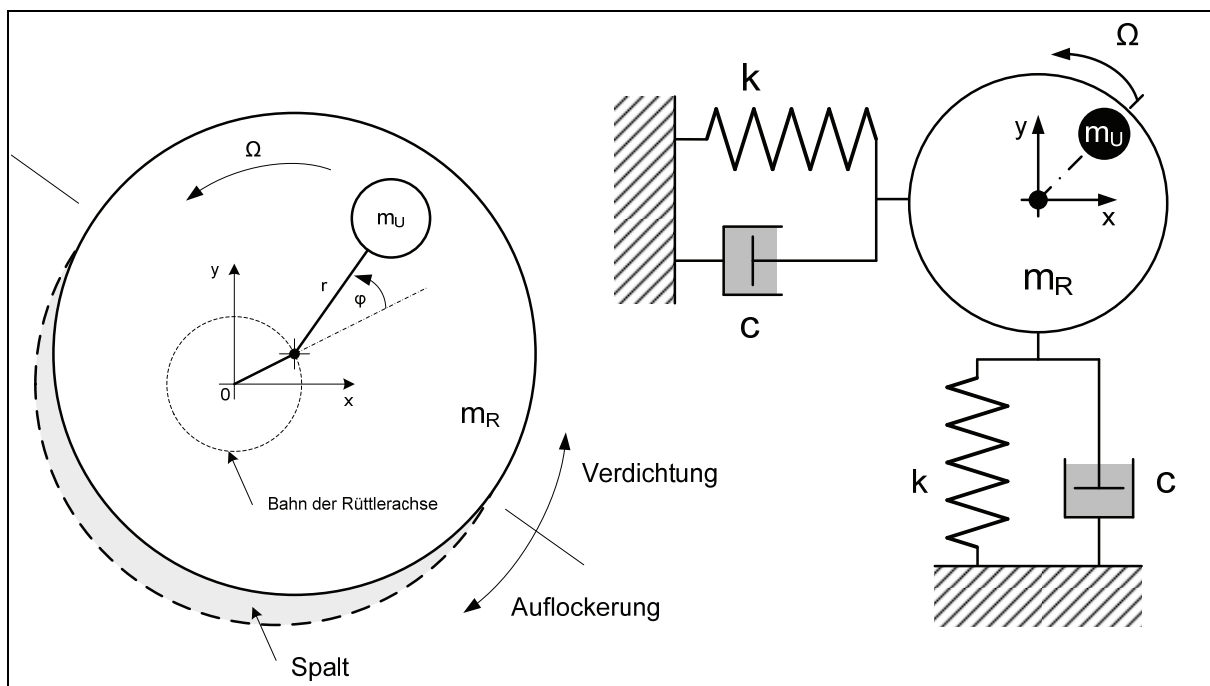


Abb. 12-2: Mechanisches Ersatzmodell der Rüttlerbewegung

Aus dem Ersatzsystem können die Bewegungsgleichungen hergeleitet werden und liefern ein Differentialgleichungssystem der Form

$$(12.6) \quad \begin{aligned} m\ddot{x} + c\dot{x} + kx &= m_U \cdot r \cdot \Omega^2 \cdot \cos \omega t \\ m\ddot{y} + c\dot{y} + ky &= m_U \cdot r \cdot \Omega^2 \cdot \sin \omega t \end{aligned}$$

mit

$m$  = Masse des Gesamtsystems ( $m_R + m_U$ )

Als Lösung dieser Gleichungen ergibt sich

$$(12.7) \quad x(t) = A \sin(\Omega t + \alpha) \quad \text{und} \quad y(t) = -A \cos(\Omega t + \alpha).$$

Die Amplitude  $A$  und der für die Abschätzung der Vibratorleistung erforderliche Phasenwinkel  $\alpha$  errechnen sich zu

$$(12.8) \quad A = \frac{m_U r \Omega^2}{\sqrt{(k - m \Omega^2)^2 + c^2 \Omega^2}}$$

$$\alpha = \arctan \frac{k - m \Omega^2}{c \Omega}.$$

Das oben dargestellte zweidimensionale Modellsystem eignet sich ferner auch zur Abschätzung der Bodenreaktionskraft  $F_B$ . Deren Komponenten wirken in den Feder- und Dämpferelementen in x- und y-Richtung und können unter Einbeziehung der schwingungstechnischen und bodenphysikalischen Größen wie folgt berechnet werden:

$$(12.9) \quad F_{Bx}(t) = A \cdot \sqrt{k^2 + c^2 + \Omega^2} \cdot \sin(\Omega t + \alpha + \Phi) \quad [kN]$$

$$F_{By}(t) = A \cdot \sqrt{k^2 + c^2 + \Omega^2} \cdot \cos(\Omega t + \alpha + \Phi) \quad [kN]$$

mit

$$\Phi = \text{Phasenwinkel} = \arctan \frac{c \Omega}{k}$$

Die resultierende Bodenreaktionskraft  $F_B$  ist in Richtung des Zentrums der Vibrationszelle orientiert und ergibt sich unter der Voraussetzung  $t=1$  [s] zu

$$(12.10) \quad F_B = \sqrt{F_{Bx}^2 + F_{By}^2} \quad [kN]$$

Diese Zusammenhänge sind in Abb. 12-3 grafisch veranschaulicht.

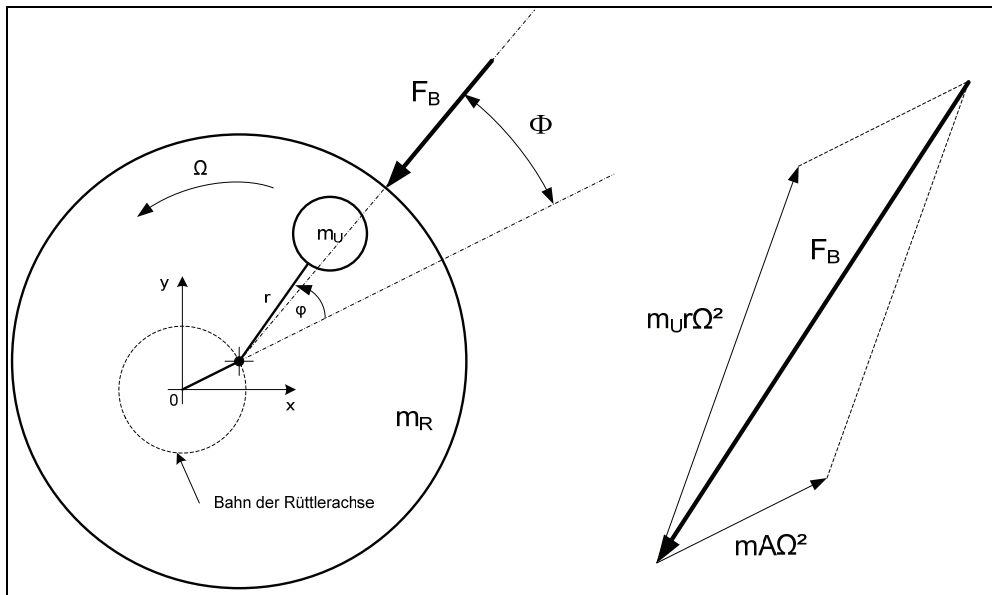


Abb. 12-3: Bodenreaktionskraft auf das Rüttlersystem

#### 12.1.4 Leistungsabschätzung des Schwingungsaggregats

Die erforderliche Vibratorleistung bzw. das Motormoment kann aus den oben dargestellten Bewegungsgleichungen des Ersatzsystems abgeschätzt werden. Hierzu wird angenommen, dass die Schwingungsamplitude  $A$  des Rüttlers sehr viel kleiner ist als der Unwuchtradius  $r$  ( $A \ll r$ ), was in guter Näherung der Fall ist. Damit ergibt sich das Moment um die Vibratorachse allgemein zu

$$(12.11) \quad M = m_U \ddot{y} r \cos \Omega t - m_U \ddot{x} r \sin \Omega t.$$

Das Einsetzen der Lösungen der Bewegungsgleichungen für  $x(t)$  und  $y(t)$  (s. Gleichungen (12.7)) liefert das auf den Motor wirkende Moment

$$(12.12) \quad M = m_U r \Omega^2 A \cos \alpha = F \cdot A \cdot \cos \alpha.$$

Daraus ergibt sich für die mechanische Leistung (ohne Berücksichtigung von Verlusten):

$$(12.13) \quad P = M \cdot \Omega = F \cdot A \cdot \Omega \cdot \cos \alpha.$$

Für die Berechnung bzw. leistungsmäßige Auslegung eines Schwingungsaggregates für eine großmaßstäbliche Anwendung ist in jedem Fall das schwingfähige Gesamtsystem, bestehend aus Vibrationszelle und Rohrsegment (Betrachtung der Gesamtmasse des Systems), anzusetzen. Darüber hinaus muss eine Berücksichtigung der Bodenreaktion erfolgen. Die oben beschriebenen Ansätze liefern die für die überschlägige Berechnung erforderlichen Kenngrößen. Ergänzend sind zahlreiche Tabellenwerte, die teilweise auf empirischen Untersuchungen basieren, in der Literatur verfügbar.

### 12.2 Vibrationstechnik

Die Applikation gezielt eingebrachter Schwingungen sind in der Bau- und Bohrwirtschaft Stand der Technik. In Kapitel 4 wurden hierzu einige Beispiele aufgezeigt und beschrieben. Die im Folgenden vorgestellten Schwingungstechnologien können prinzipiell auch für die hier vorliegende Aufgabenstellung Anwendung finden.

Die im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit untersuchte Applikation von Schwingungstechnik mit dem Ziel der Reduzierung der Rohreinziehkkräfte beim HDD, zeigte, dass die Effektivität des Verfahrens grundsätzlich leistungsfähige Schwingungserreger erfordert. Diese müssen imstande sein, die beim HDD häufig verwendeten großkalibrigen und schweren Rohre möglichst verlustarm und zumindest in kritischen Teilsektionen des Bohrlochs in hochfrequente Schwingungen zu versetzen. Hierbei sind insbesondere die Baugrundverhältnisse sowie die sich mit zunehmendem Einziehfortschritt dynamisch ändernden Einspannverhältnisse zu berücksichtigen, da diese durch Dämpfungseffekte einen großen Einfluss auf die erforderliche Vibratorleistung nehmen.

Resultierend aus der gleichzeitigen Forderung, dass die Tagesoberfläche bzw. der umgebende Baugrund in einem bestimmten Radius möglichst nicht negativ beeinflusst werden sollte, wie beispielsweise durch Verdichtungs- oder Setzungserscheinungen, kommt auch der Wahl der geeigneten Schwingungsart eine große Bedeutung zu.

Charakteristisch für rotierende Unwuchtaggregate ist die Erzeugung einer sinusförmigen Kennlinie des Kraftverlaufs. Der Schwingungserreger prägt dem Gesamtsystem seine zyklischen Rotationskräfte auf, wodurch dieses ebenfalls umlaufend radial beschleunigt wird.

Der Baugrund als weiteres schwingfähiges System strebt dabei ein Mitschwingen in Form einer harmonischen Oszillation an. Durch gleichförmiges Mitschwingen kann insbesondere bindiger Boden am Vortriebsgut anhaften. Hierdurch vergrößert sich die schwingende Gesamtmasse was zu einer Abnahme der Schwingungsamplitude führt. Im Extremfall verbraucht sich die eingeleitete Schwingungsenergie vollständig zur reinen Anregung des Baugrunds. Diesem Effekt durch den Einsatz leistungsfähigerer Vibratoren zu begegnen führt

zu in einer erheblichen Steigerung der Maschinen- und Energiekosten und geht damit nicht zuletzt mit einer erhöhten Umweltbelastung durch Lärm und Abgase einher.

Jüngere Forschungen befassen sich aus diesem Grund mit Entwicklungen zur Anpassung des Fliehkraftverlaufs. Ein Beispiel hierfür ist das sog. gerichtete Vibrieren. Das Prinzip basiert auf der Überlagerung der sinusförmigen Grundkraftkennlinie durch eine Oberschwingung. Durch die dadurch herbeigeführte zusätzliche Beschleunigung wird die Verbindung zwischen dem mitschwingenden Boden und dem Vortriebsrohr bei jedem Schwingungsimpuls gelöst. Die periodische Entkopplung von Baugrund und Vortriebsgut führt zu einer Reduzierung der Mantelreibung und einer partiellen Unterbrechung der Energieübertragung auf den Boden, wodurch unerwünschte Schwingungen der Umgebung verringert werden [1],[9],[34],[40],[41].

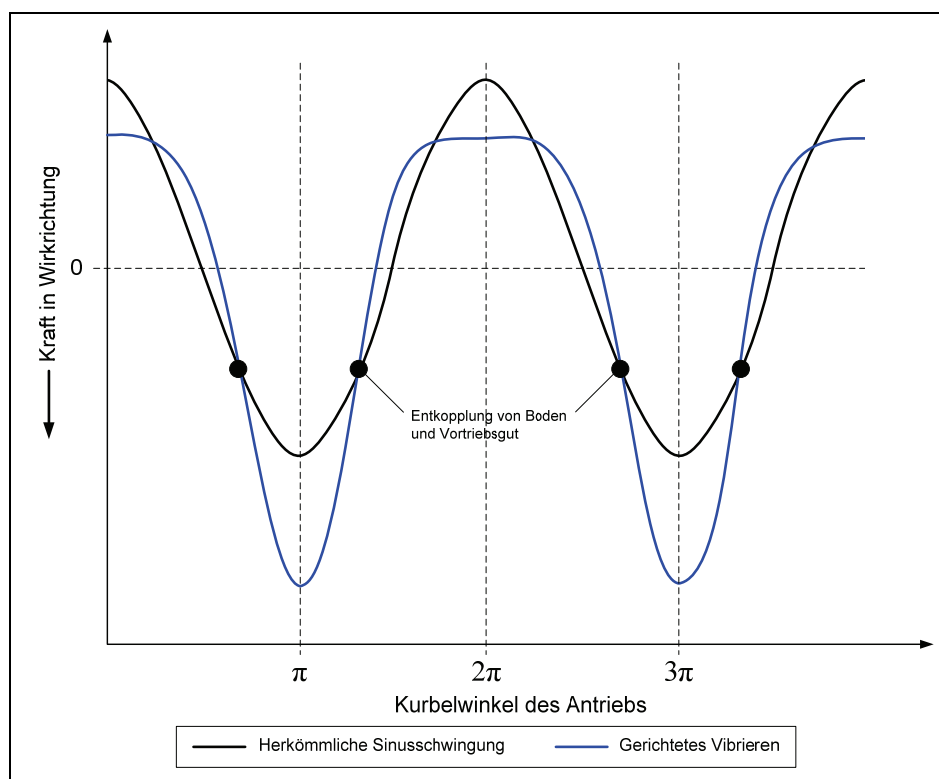


Abb. 12-4: Grundprinzip des Gerichteten Vibrierens

Gleichzeitig bewirken die eingeleiteten Vibrationen im wasserführenden Baugrund die Erzeugung eines dünnen temporären Flüssigkeitsfilms zwischen Rohroberfläche und Baugrund, der als Gleitschicht wirkt und den Einziehvorgang erleichtert. Im bindigen Boden werden durch die Vibrationen und den zyklischen Wechsel der Verformung die inneren Kohäsionskräfte reduziert, was ebenfalls zu einer Minimierung der Reibkräfte führt.

Die Schwingungsfrequenz der erforderlichen Hochleistungsvibratoren bei der Anwendung beim Rohrvortrieb muss oberhalb der Eigenfrequenz des Baugrunds angeordnet sein, um eine negative Beeinflussung des umgebenden Bodens zu vermeiden. Problematisch hierbei ist

allerdings der Anfahr- bzw. Auslaufvorgang der Vibrationszelle, bei dem kurzzeitig der Resonanzbereich des Bodens durchfahren wird.

Zur Vermeidung dieses Problems wurden Schwingungserreger mit verstellbaren Unwuchtsegmenten entwickelt, durch die das statische Moment stufenlos verändert werden kann. Daraus resultiert die Möglichkeit, einen vibrationsfreien An- bzw. Auslauf des Aggregates (statisches Moment = 0) bis zur Betriebsdrehzahl zu ermöglichen. Beim Erreichen der Arbeitsfrequenz werden die Unwuchten gegensinnig verstellt und ein für den Vortrieb günstiges Moment gewählt. Das maximale statische Moment wird erreicht, wenn die Unwuchtsegmente in gleicher Stellung sind. Abb. 12-5 zeigt schematisch den Einfluss der Verstellung des statischen Moments auf die Schwingungsamplitude.

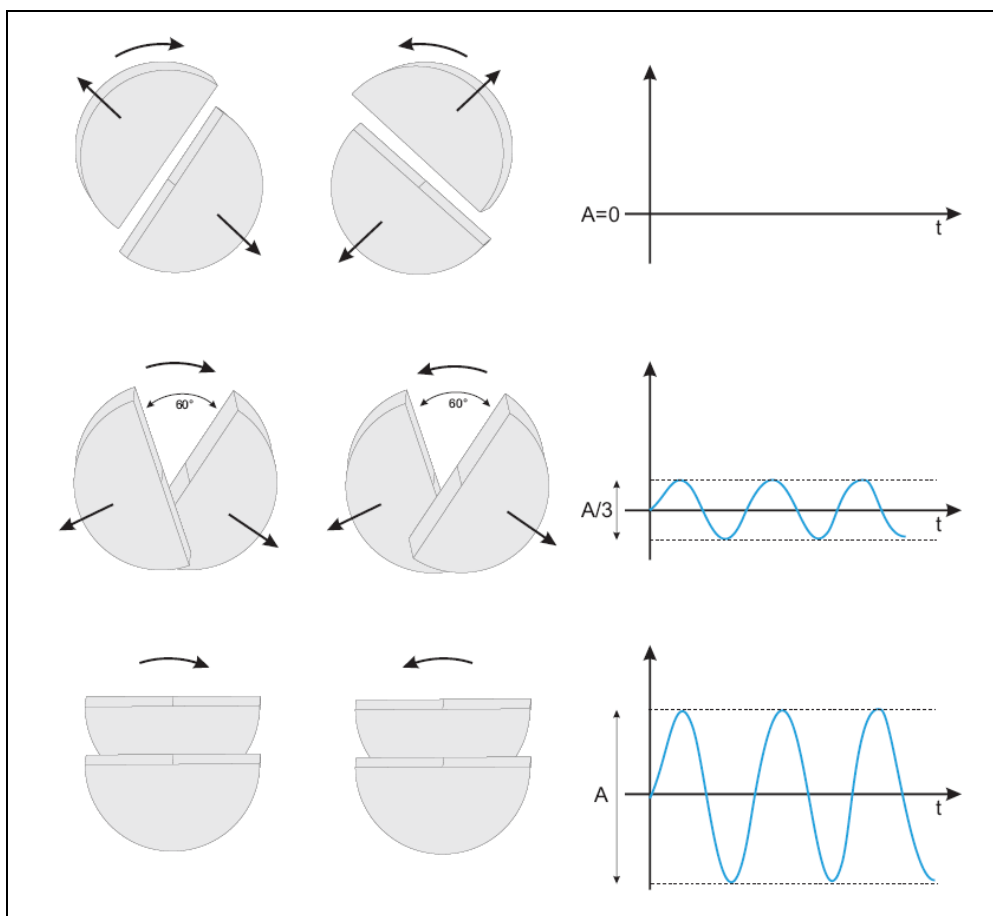


Abb. 12-5: Statisches Moment des Schwingungserregers und Einfluss auf die Amplitude

Aus technischer Sicht können prinzipiell zwei verschiedene Vibratorsysteme den oben beschriebenen Anforderungen gerecht werden, nämlich

- die rotierende Kurbelschleife und
- ein Vibrationsbär mit unterschiedlich schnell laufenden Unwuchtpaaren.



Mit der sog. rotierenden Kurbelschleife können periodisch veränderliche Winkelgeschwindigkeiten der Unwuchtsegmente realisiert werden. Das Konstruktionsprinzip dieses Antriebskonzeptes besteht aus einer rotierenden Antriebsschwinge sowie einer versetzt drehbar gelagerten Unwuchtmasse, die über eine Gleitführung von der Schwinge in Drehung versetzt wird. Die stufenlose Anpassung der Kraftkennlinie an die erforderlichen Bedingungen erfolgt über die Variation der Exzentrizität zwischen Antrieb und Unwucht und kann im laufenden Betrieb vorgenommen werden. Zur Erzeugung einer überlagernden Vertikalschwingung werden zwei gegenläufig rotierende Kurbelschleifen in dem Vibrator gekoppelt (Abb. 12-6).

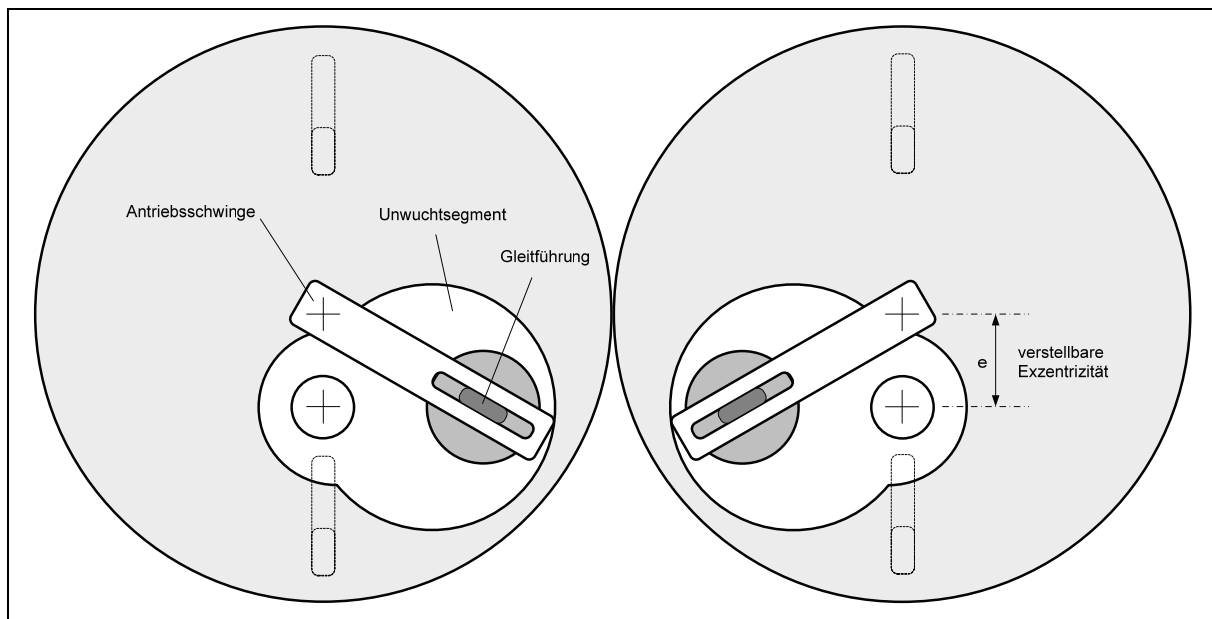


Abb. 12-6: Antriebsprinzip der rotierenden Kurbelschleife

Das zweite Antriebskonzept unterscheidet sich von herkömmlichen Vibratoren durch die Integration von mindestens einem, mit höherer Drehzahl rotierendem Unwuchtpaar. Eine Prinzipskizze des Aufbaus eines derartigen Schwingungserregers enthält Abb. 12-7.

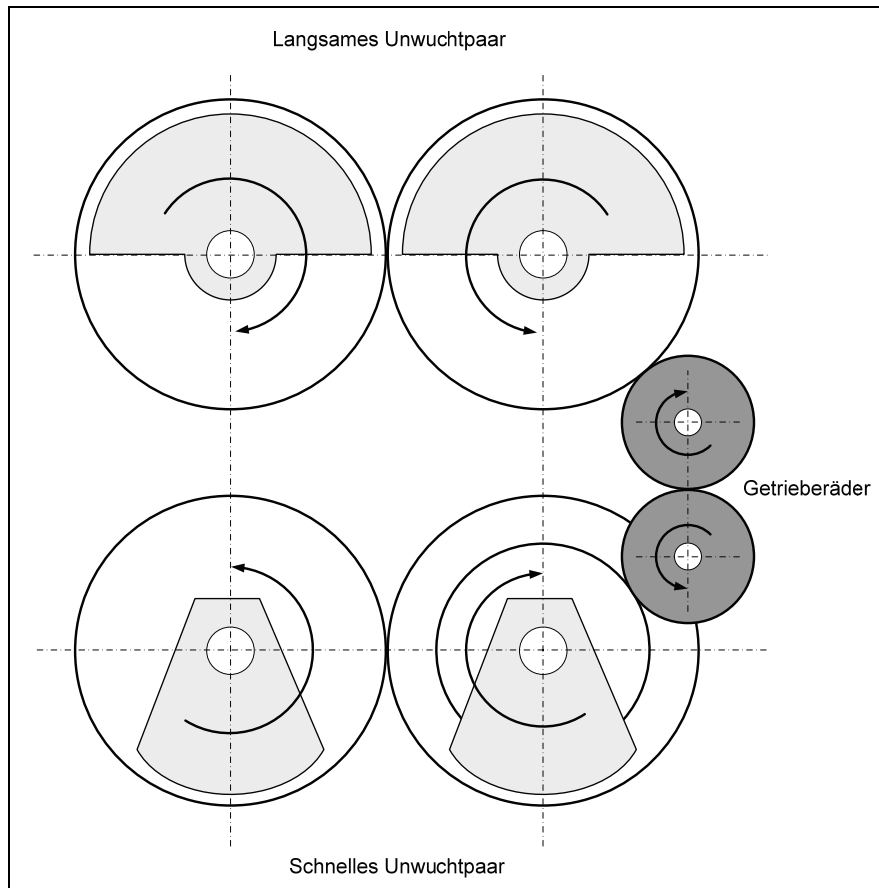


Abb. 12-7: Antriebsprinzip mit unterschiedlich schnell rotierenden Unwuchtpaaren

Aufgrund der besseren Regelbarkeit sowie aus Gründen der Vermeidung von Druckverlusten in Schlauchleitungen bei pneumatisch betriebenen Vibratoren sollten elektrische Vibratorantriebe bei der großtechnischen Umsetzung vorrangig in Betracht gezogen werden. Mit moderner Regeltechnik kann ein präziser Synchronlauf mehrerer Vibratoren gewährleistet werden, die dann zusammen eine Einheit mit entsprechend höherer Leistung bilden.

### 12.3 Rohrinterne Verspannung

In der Anfangsphase der Projektbearbeitung wurden im kleinen Maßstab Einziehversuche unter Vibrationseinfluss durchgeführt, wobei der Schwingungseintrag über eine externe Turbineneinheit erfolgte, die auf einem Rohrende, d.h. außerhalb des Materialkastens, montiert war. Obgleich auf diese Weise sehr gute qualitative Ergebnisse bzgl. der Reduzierung der erforderlichen Einziehkraft erzielt wurden, was u.a. auch auf die geringe Gesamtdimension der Versuchsanlage und damit den doch eher realitätsfremden Maßstab zurückgeführt werden kann, ist diese Methode der Schwingungseinleitung für eine Feldanwendung nicht praktikabel. Das Aufmontieren eines externen Vibrators, sei er auch noch so leistungsstark, würde keine Effekte bzgl. der Zugkraftreduzierung hervorrufen, da die Wirklänge des Schwingungseintrags

über den Rohrstrang aufgrund von Materialdämpfung und sonstigen Verlusten stark begrenzt ist (wenige Meter).

Vielmehr besteht daher die Forderung, wie sie letztlich im Rahmen der Forschungsarbeit auch umgesetzt wurde, nach einer rohrinternen Vibrationseinheit, über welche die Schwingungen direkt in vermeintlich kritische Bohrlochsektionen eingeleitet werden können.

Erfahrungsgemäß treten die größten Reibwerte, die letztlich die erforderliche Zugkraft des Bohrgerätes determinieren, einerseits dort auf, wo das einzuziehende Produktrohr aufgrund des bogenförmigen Verlaufs des Bohrkanals in Kontakt mit dem umgebenden Baugrund tritt. Ferner tragen ungünstige Baugrundverhältnisse, die mitunter zu einem Verschluss des Bohrkanals führen (z.B. durch Zusammenbruch des Bohrlochs oder quellende Tone), zu einer Steigerung der Reibkräfte und damit der Einziehkraft bei.

Aus diesem Umstand resultiert die Forderung nach einem Schwingungsaggregat, das mittels einer geeigneten Vorrichtung innerhalb des Rohres gezielt in kritische Bereiche verfahren werden kann, d.h. an diejenigen Stellen, an denen erwartungsgemäß erhöhte Reibwerte auftreten. Die an diesen Stellen eingeleiteten Vibrationen können zur Reduzierung der Reibkräfte beitragen, sofern sie das betreffende Rohrsegment möglichst verlustfrei und durch ausreichenden Leistungseintrag zur Schwingung anzuregen vermögen. Aus diesem Grund ist eine stabile und gleichzeitig lösbare Verspannung des Aggregates im Rohr erforderlich.

Im Rahmen der Technikumsversuche wurde die selbst gebaute pneumatische rohrinterne Vibrationszelle über radial angeordnete Hydraulikzylinder zentrisch im Rohr verspannt. Die Beaufschlagung der Zylinder mit Hydraulikflüssigkeit erfolgte über eine Handpumpe (Lukas-Pumpe). Die Inkompressibilität des Hydraulikmediums gewährleistet eine ausreichend gute Übertragung der Erregerschwingungen auf das Rohr. Dieses System hat sich im Rahmen der Versuchsdurchführung sehr gut bewährt und kann grundsätzlich auch für eine großtechnische Umsetzung in Betracht gezogen werden. Hierzu sind im Vorfeld noch detaillierte konstruktive Planungen durchzuführen.

## 13 Zusammenfassung und Ausblick

Die HDD-Technologie stellt heute ein modernes und leistungsfähiges Verfahren zur grabenlosen Verlegung von Versorgungsleitungen dar und ist Stand der Technik. Das Einsatzspektrum des HDD-Verfahrens wurde durch Entwicklungsprozesse und Optimierungen stetig erweitert, insbesondere aufgrund der Vielzahl von Vorteilen gegenüber anderen, konventionellen Rohrverlegetechniken, aber auch aufgrund der steigenden Nachfrage nach großkalibrigen Bohrungen über 2 km Länge im internationalen Raum.

Dieser Trend stellt besondere Ansprüche an die Leistungsfähigkeit des Verfahrens und die maschinelle Ausrüstung. Wie die Praxis zeigt, ist das HDD-Verfahren nicht von Rückschlägen verschont geblieben. Schadensfälle in Form des Steckenbleibens oder der Havarie einer zu installierenden Rohrtour sind keine Seltenheit. Sie resultieren einerseits aus den mit zunehmender Einziehlänge stetig wachsenden Reibungskräften entlang der gekrümmten Bohrachse. Darüber hinaus können ungünstige Baugrundverhältnisse und damit ein instabiler Bohrkanal zu einem überproportionalen Anstieg der Zugkraft führen, die im Extremfall vom Bohrgerät nicht mehr aufgebracht werden kann. In der Praxis werden im Schadensfall große technische Aufwendungen betrieben, um die Leitung und damit das Projekt zu retten, oftmals jedoch ohne Erfolg. Im ungünstigsten Fall muss die Bohrung aufgegeben werden, was mit hohen wirtschaftlichen Verlusten verbunden ist.

Das am Lehrstuhl für Tagebau und Internationaler Bergbau der TU Clausthal durchgeführte Forschungsprojekt hat sich dieser verfahrenstechnischen Problematik angenommen, mit dem Ziel, eine Methode zu entwickeln, mit der die erforderlichen Einziehkkräfte beim Installationsvorgang einer Rohrleitung mittels des Einsatzes von Vibrationstechnik herabgesetzt werden können. Die im Rahmen des Projektes geleisteten Untersuchungen haben Entwicklungscharakter und können sich bislang auf keine praktischen Erfahrungen stützen.

Ziel und Aufgabe der Forschungsarbeiten war es, ausgehend vom Stand der Technik und praktischen Erfahrungen beim Einsatz der HDD-Technologie, durch empirische Untersuchungen im Technikumsmaßstab Lösungsansätze zur Optimierung des Einziehvorganges von Rohrleitungen zu erarbeiten. Dabei sollte vorrangig der Einfluss der Einleitung gezielter Schwingungen in die zu installierende Rohrleitung auf die auftretenden Einziehkkräfte untersucht werden. D.h. einerseits sollten die erforderlichen Zugkräfte während des konstanten Einziehvorganges reduziert und andererseits die Möglichkeit geschaffen werden, ein bereits festgefahrenes Produktrohr zu lösen, also die erforderlichen initialen

Losbrechkräfte herabzusetzen. Durch die Untersuchungen wird somit ein Beitrag zur Reduzierung des Baurisikos geleistet.

In einer ersten Projektphase wurde mittels einer kleinmaßstäblichen Pilotversuchsanlage die prinzipielle Eignung und Machbarkeit des ‚Vibrationsverfahrens‘ untersucht. Die positiven Ergebnisse haben Anlass gegeben, das Projekt in einer anschließenden und auf den Pilotversuchen aufbauenden Versuchsphase weiterzuführen, insbesondere mit der Zielsetzung der Quantifizierung der auf die Zugkraft Einfluss nehmenden Parameter. Daraus sollen letztlich Aussagen zur Möglichkeit der Verfahrensoptimierung sowie zur großtechnischen Einsatzeignung abgeleitet werden. Ergänzt werden die praktischen Versuche durch theoretische Betrachtungen in Form von Modellrechnungen unter Berücksichtigung Einfluss nehmender Randparameter.

Für die Umsetzung der theoretischen Ansätze wurde am Lehrstuhl für Tagebau und Internationaler Bergbau des Instituts für Bergbau der TU Clausthal eine Versuchsanlage in einem realitätsnahen Maßstab konstruiert. Die Versuchsrohre werden durch eine Stahlkastenkonstruktion geführt, in der sich Bodenmaterial befindet. Über ein umlaufendes Zugseil kann das eingebaute Rohr mit zwei Geschwindigkeitsstufen (1 m/min und 0,5 m/min) verfahren werden, die Zugkraft wird dabei über eine kopfseitig zentrisch installierte Zugkraftmessdose erfasst und EDV-gestützt aufgezeichnet. Für die Versuche wurden Böden ausgewählt, die typischerweise beim HDD durchörtert werden (Sand und Schluff). Zur Simulation eines Insitu-Überlagerungsdrucks wurde auf das im Kasten befindliche Bodenmaterial mittels pneumatischer Hebekissen eine statische Auflast eingeleitet. Das Kernstück der Versuchsanlage bildet eine im Rohr installierte Vibrationseinheit deren Frequenz stufenlos geregelt werden kann. Für die Versuchsreihen wurden hauptsächlich in der Praxis übliche PE-ummantelte Rohre der Dimensionen DN100, DN150 und DN200 verwendet. Zur Ermittlung des Einflusses der Rohroberflächenbeschaffenheit wurden zusätzlich Versuche mit einem DN100 Stahlrohr ohne Ummantelung durchgeführt.

Orientiert an der Zielsetzung des Forschungsprojektes wurden systematisch Zugversuche unter verschiedenen Randbedingungen, jeweils mit den verschiedenen Rohrtypen, durchgeführt. Als Zielgröße wurde jeweils die erforderliche Einziehkraft messtechnisch aufgezeichnet. Zur Erfassung der aus den initiierten Schwingungen resultierenden Effekte im Sinne der gewünschten Zugkraftreduzierung wurden die Randparameter sukzessive variiert. Zur Identifizierung des optimalen Schwingungseintrags wurde die eingeleitete Schwingungsenergie über die Frequenz des Vibrationsaggregates stufenweise verändert. Ferner wurden Versuche unter Variation der Einziehgeschwindigkeit durchgeführt. Diese Randgrößen stellen für eine großtechnische Praxisanwendung variable und technisch realisierbare Parameter dar. Zur Ermittlung des Einflusses der Auflastspannung (Bodenüberdeckung, Bohrlochteufe) auf die erforderliche Einziehkraft wurde in ausgewählten

Versuchen die vertikale Auflast stufenweise verändert. Darüber hinaus wurden Zugversuche in verschiedenen Bodenmaterialien vorgenommen.

Die Versuchsergebnisse der einzelnen Messreihen bestätigten generell den theoretischen Ansatz, dass mittels der Einleitung gezielter Schwingungen in die zu installierende Rohrleitung eine effektive Zugkraftreduzierung herbeigeführt werden kann. Dies gilt sowohl für die initiale Losbrechkraft, als auch für die konstante Zugkraft (Gleitkraft) während des Einziehvorgangs.

Die wesentlichen Erkenntnisse des versuchstechnischen Teils der Forschungsarbeiten können wie folgt zusammengefasst werden:

Generell konnte bei den Zugversuchen festgestellt werden, dass sich die erforderliche Einziehkraft durch die mittels der im Rohr installierten Vibrationseinheit eingeleiteten Schwingungen effektiv reduzieren lässt. Der Großteil der Versuche wurde mit einer elektrisch betriebenen Schwingungseinheit (Betonrüttler) durchgeführt, die gewählten Frequenzbereiche waren 0, 80, 100, 150 und 200 Hz. Wie die Versuchsergebnisse zeigten, führte in allen untersuchten Fällen der intensivste Schwingungseintrag bzw. die höchste verfügbare Vibratorfrequenz (200 Hz) zur effektivsten Reduzierung der Zugkraft. Dies gilt sowohl für die initiale Losbrechkraft, bei der die Haftreibung beim Anfahren der Anlage überwunden werden muss, als auch für die Gleitkraft, die sich während des geschwindigkeitskonstanten Einziehvorgangs einstellt. Der Mindestschwingungsenergieeintrag, der für eine effektive Zugkraftreduzierung erforderlich ist, hängt darüber hinaus von weiteren Faktoren ab, wie beispielsweise der Art und den Eigenschaften des Baugrunds, dem Überlagerungsdruck (Auflast) und der Rohrgeometrie (Masse des schwingfähigen Gesamtsystems).

Die besten Ergebnisse im Sinne der Zugkraftreduzierung wurden im kohäsiven Baugrundmaterial (Schluff) erzielt. In den entsprechenden Versuchsreihen mit dem DN 200 PE-ummantelten Rohr konnte mittels des Schwingungseintrags für die Losbrechkraft eine maximale Zugkraftreduzierung von ca. 20% und für die Gleitkraft von ca. 15% erreicht werden. Hierfür war ein Mindestschwingungseintrag von >150 Hz erforderlich. Gekennzeichnet durch die nach unten ‚offene‘, abfallende Zugkraftkennlinie im Bereich der höchsten realisierten Frequenz, kann davon ausgegangen werden, dass das Maximum der möglichen Zugkraftdifferenz im Schluffboden noch nicht erreicht wurde. Im Sandmaterial ergaben sich durchschnittliche Zugkraftreduzierungen von ca. 8% für die initiale Losbrechkraft und ca. 11% für die Gleitkraft.

Die aus dem Schwingungseintrag resultierenden Effekte im Sinne der Zugkraftreduzierung sind auf die Interaktion des Bodens mit dem schwingenden System zurückzuführen. Im Falle unzureichender Drainagebedingungen werden die eingeleiteten Kräfte zunächst nur vom Porenwasser aufgenommen. Die Vibrationen bewirken in einer schmalen Bodenzone um die Rohroberfläche einen Anstieg des Porenwasserdrucks (behinderte Drainagebedingungen, vor

allem im kohäsiven Baugrund) und die Ausbildung eines dünnen, pseudoplastischen Verflüssigungsfilms. Infolge dessen werden die Scherkräfte und damit auch die Reibkräfte herabgesetzt. Ein Indiz für diese Erscheinungen wurde beim Ausbau der Versuchsrohre sichtbar. So konnten im Sandmaterial Klassierungseffekte in Form der Konzentration von Feinkornanteilen im unmittelbaren Nahbereich der Rohroberfläche festgestellt werden. Im bindigen Modellboden zeigte sich beim Freilegen des Rohres eine breiig-flüssige Konsistenz des Schluffbodens in einem engen Grenzbereich zwischen Rohroberfläche und Boden.

Versuche unter Variation der statischen Auflast (Simulation eines Insitu-Überlagerungsdrucks) ohne Vibrationseinleitung erbrachten erwartungsgemäß das Ergebnis, dass sich sowohl die Losbrechkraft als auch die Gleitkraft mit zunehmender Auflast (näherungsweise linear) erhöht. Dies gilt sowohl für beide untersuchten Bodenarten als auch für die verschiedenen Rohrdimensionen und Oberflächenbeschaffenheiten. Ferner zeigt sich, dass der Differenzbetrag zwischen Losbrech- und Gleitkraft mit zunehmender Auflast größer wird. Bei den Versuchen mit dem DN100 Stahlrohr (ohne PE-Ummantelung) waren beim Einziehvorgang im Sandboden deutliche Lastspitzen (Slip-Stick-Effekte) zu beobachten, die sich mit Erhöhung der Auflast verstärkten. Hier erfolgte ein zyklischer Wechsel zwischen Haften und Gleiten, was eine hohe Materialbelastung, nicht zuletzt auch für die Versuchsanlage, darstellte. Ein konstanter Gleitvorgang durch Überwindung der Haftfestigkeit konnte (ohne Vibrationseinleitung) hier nicht erreicht werden.

Mit dem DN100 Stahlrohr wurden Versuche unter Verwendung zweier Vibratoren mit unterschiedlichen Leistungen durchgeführt. Der elektrisch betriebene Betonrüttler entwickelt eine um den Faktor 2,3 höhere Leistung als der selbstgebaute pneumatische Vibrator und realisiert Drehzahlen bis maximal 200 Hz. Wie sich zeigte, konnten mit der pneumatischen Vibrationszelle lediglich kleine Zugkraftdifferenzen (im gemeinsamen Frequenzbereich mit dem Betonrüttler) erzielt werden, was auf die geringe Leistung des Aggregates zurückgeführt werden kann.

Zur Untersuchung des Einflusses der statischen Auflast in Kombination mit dem frequenzvariablen Schwingungseintrag auf die erforderliche Einziehkraft wurden für alle drei PE-ummantelten Rohre Versuchsserien durchgeführt, in denen jeweils die statische Auflast verändert wurde (200 kN/m<sup>2</sup>, 400 kN/m<sup>2</sup>). Die Versuchsergebnisse zeigten, dass unabhängig von der gewählten Auflast annähernd gleiche Effekte im Sinne der Zugkraftreduzierung auftreten. Lediglich die absoluten Kraftwerte lagen mit zunehmender Auflast entsprechend höher. Für das DN100 PE-ummantelte Rohr ergibt sich eine prozentuale Zugkraftdifferenz in ausschließlicher Abhängigkeit der Auflast von durchschnittlich 3,8% für die Losbrechkraft und 3,0% für die Gleitkraft, für das DN150 PE-ummantelte Rohr von 4,3% bzw. 3,9% und für das DN200 PE-ummantelte Rohr von 5,6% bzw. 7,1%.

Um dem Einflussparameter ‚Rohrgeometrie‘ versuchstechnisch nachzugehen, wurde eine Auswertung der erzielten Messergebnisse für die drei unterschiedlichen PE-ummantelten Rohrtypen (DN100, DN150, DN200) und eine entsprechende vergleichende Darstellung vorgenommen. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass grundsätzlich mit zunehmendem Rohrdurchmesser ein größerer (Mindest-) Schwingungseintrag (Frequenz) erforderlich ist, um eine Zugkraftverringerung herbeizuführen. Während für die Losbrechkraft beim DN100 Rohr ab einer Frequenz  $>100$  Hz eine Kraftreduzierung erkennbar wird, die im Bereich von ca. 150 Hz ihr Maximum erreicht (gültig für 200 kN/m<sup>2</sup> Auflast), zeigen sich bei der Gleitkraft diese Effekte schon früher, d.h. ab einer Frequenz von 80 Hz und einem Maximum bei ca. 100 Hz. Eine Steigerung der Schwingungsfrequenz über diese Frequenzwerte hinaus führt zu keiner weiteren Zugkraftreduzierung (‚Sättigung‘). Den gleichen Trend zeigen die Messwerte für das DN150 Rohr, wobei der Mindestschwingungseintrag für die Losbrechkraftreduzierung im Bereich von ca. 100 Hz liegt und sich das Zugkraftminimum ab einer Frequenz von ca. 150 Hz einstellt. Im Falle des DN200 PE-ummantelten Rohres waren die höchsten Vibrationsfrequenzen zur effektiven Zugkraftreduzierung (sowohl Losbrech- als auch Gleitkraft) erforderlich. Hier waren Frequenzen  $>150$  Hz notwendig, wobei kein Zugkraftminimum erreicht wurde, was darauf hindeutet, dass eine weitere Zugkraftreduzierung über den hier maximal technisch erreichten Schwingungseintrag von 200 Hz hinaus prinzipiell möglich ist.

Im Rahmen der Versuche konnten als variable Einflussgröße zwei unterschiedliche Vortriebsgeschwindigkeiten realisiert werden (1 m/min und 0,5 m/min). Während bei den Zugversuchen, denen ausschließlich eine Betrachtung der Gleitkräfte zugrunde lag, im Sandboden mit dem DN100 Stahlrohr lediglich eine Herabsetzung der Zugkraft um durchschnittlich 2,8% erzielt werden konnte, erbrachte die Halbierung der Einziehgeschwindigkeit bei den PE-ummantelten Rohren eine prozentuale Zugkraftverringerung von durchschnittlich 5,5% (DN100: 5,3%, DN150: 5,7%, DN200: 5,4%) im Sand. Im schluffigen Modellboden dagegen wurden im Mittel Zugkraftdifferenzen von 7,6% erreicht, der Spitzenwert lag hier unter Berücksichtigung des Schwingungseintrags bei 11,8% (bei 200 Hz). Besonders im kohäsiven Boden zeigt sich, dass der Aufbau einer aus dem Vibrationseintrag resultierenden schmalen, pseudoplastischen Verflüssigungszone eine Funktion der Einwirkdauer der Schwingungen ist.

Zur Untersuchung des Einflusses der Rohroberflächenbeschaffenheit wurden die durchmessergleichen DN100 Rohre verwendet (Stahloberfläche, PE-Oberfläche). Die Messergebnisse lieferten diesbezüglich eindeutige Ergebnisse. Die Auswertung der Versuche ohne Vibrationseintrag in Abhängigkeit der statischen Auflast ergab für die Gleitkraft eine durchschnittliche Zugkraftreduzierung von 4,9% bei der PE-Oberfläche im Vergleich zur Stahloberfläche. Für die Losbrechkraft wurde ein prozentualer Durchschnittswert von 13,5% errechnet. Dieses Ergebnis belegt grundsätzlich die besseren Gleiteigenschaften der PE-



Ummantelung gegenüber der Stahloberfläche. Vor allem für die Losbrechkraft zeigt sich eine deutliche Herabsetzung der Haftungskräfte, die bei der Messwertaufnahme dadurch erkenntlich wurden, dass beim Anfahren der Versuchsanlage keine ausgeprägten initialen Lastspitzen, die die Überwindung der Haftreibung bzw. Scherkräfte kennzeichnen, auftraten. Ist die Haftreibung überwunden und es stellt sich Gleitreibung ein, die die Restscherfestigkeit kennzeichnet, wird der Einfluss der Rohroberflächenbeschaffenheit geringer. Beim Versuchsrohr ohne Ummantelung war ferner, bei ausgeschaltetem Schwingungsaggregat, ein sehr ungleichförmiger Einziehvorgang zu beobachten, der gekennzeichnet war durch einen zyklischen Wechsel zwischen Haften und Gleiten (Slip-Stick). Durch den Vibrationseintrag konnten diese Wechsellasten vermieden werden, wobei hierfür bereits ein geringer Schwingungseintrag von 80 Hz bei 0 kN/m<sup>2</sup> Auflast bzw. von 100 Hz bei den gewählten höheren Auflasten ausreichte. Bei den PE-ummantelten Rohren waren diese Erscheinungen nicht zu beobachten, der Übergang von der Haftreibung zur Gleitreibung erfolgt hier fließend und ohne Lastspitzen. Unter dem Einfluss von Schwingungen konnten auf die Rohrbeschichtung zurückzuführende Zugkraftdifferenzen von durchschnittlich 14,2% bei der Losbrechkraft und 10,2% bei der Gleitkraft ermittelt werden. Auch hier liefern die materialspezifischen Reibwerte eine Erklärung für diesen Effekt.

Um der Fragestellung nach der optimalen Position des Schwingungsaggregates innerhalb des Rohres zur effektiven Zugkraftreduzierung nachzugehen, wurden ausgewählte Versuche mit dem DN100 Stahlrohr derart durchgeführt, dass insgesamt drei verschiedene Startpositionen für das Testrohr bzw. den fest installierten rohrinternen Vibrator festgelegt wurden. Diese markierten das erste Viertel, die Mitte sowie das letzte Viertel der gesamten Messstrecke innerhalb des Materialkastens. Bei der Versuchsdurchführung wurde das Schwingungsaggregat jeweils 60 Sekunden vor Zugbeginn mit einer Frequenz von 200 Hz gestartet. Die Auflast wurde auf 200 kN/m<sup>2</sup> eingestellt.

Unter der Voraussetzung konstanter Versuchsbedingungen konnte festgestellt werden, dass die geringsten Zugkraftwerte (sowohl Losbrech- als auch Gleitkraft) beim Start aus dem ersten und letzten Viertel des Materialkastens erreicht wurden, wohingegen sich beim Einziehstart aus der mittigen Position die höchste Zugkraft einstellte. Die maximale gemessene Zugkraftdifferenz in Abhängigkeit der Startposition betrug dabei lediglich für die Losbrechkraft 1,5% und für die Gleitkraft 2,2%.

Der Effekt der Positionsabhängigkeit kann mit dem Einfluss der frei schwingenden Rohrlänge bzw. der damit zusammenhängenden Schwingungsamplitude erklärt werden. Die Höhe der Amplitude wird in erster Linie von der Zentrifugalkraft des Vibrationsaggregates bestimmt und ist abhängig von den technischen Kenngrößen Kreisfrequenz, Unwuchtmasse und Exzentrizität. Die Zentrifugalkraft ist diejenige Kraft, die das Rohr aus der Ruhelage auslenkt und in eine Biegeschwingung versetzt. Unter Berücksichtigung der Randbedingungen ist das Maß der Amplitude, welches entscheidenden Einfluss auf die Ausbildung des

Porenwasserdrucks nimmt, abhängig von den Einspannverhältnissen des Rohres, die sich während des Einziehvorganges laufend ändern. Die Einspannung ist folglich, aufgrund der Erkenntnisse aus den Zugversuchen, in der mittigen Position des Rohres innerhalb des Materialkastens am stärksten. Zu weiteren Einflussgrößen zählen der Angriffspunkt der durch den Vibrator erzeugten Zentrifugalkraft, die Auflastspannung, die Dämpfung sowie das Biegewiderstandsmoment des Rohres.

Zur Beantwortung der Frage, ob die initiierten Schwingungen einen Einfluss auf die Materialfestigkeit der einzuziehenden Rohrleitung bzw. auf Verbindungselemente nehmen, wurde mittels der FE-Methode ein Festigkeitsnachweis für den Lastfall ‚Rohrvortrieb mit Vibrationseintrag‘ vorgenommen. Die Berechnungen ergaben, dass die im Rahmen der Versuche eingeleiteten Schwingungen nicht zu einer Schädigung des Rohres führen. Im Hinblick auf die Verwendung leistungsstärkerer Schwingungsaggregate für einen evtl. Feldeinsatz kann der entwickelte analytische Ansatz dazu dienen, die Materialbeanspruchung, die aus den initiierten Schwingungen resultiert, abzuschätzen.

Insgesamt kann folgendes **Gesamtfazit** gezogen werden:

Durch den Einsatz der Schwingungstechnologie erschließt sich dem HDD-Verfahren ein neuer Optimierungsansatz im Hinblick auf die Reduzierung der erforderlichen Zugkräfte beim Einziehen einer Rohrleitung. Hierdurch eröffnen sich beispielsweise erweiterte verfahrenstechnische Möglichkeiten im Hinblick auf die erreichbare Einziehlänge und Rohrdimension. Darüber hinaus wird ein Beitrag zur Arbeitssicherheit und Risikominimierung geleistet.

Die Schwingungsapplikation bei der grabenlosen Rohrverlegung empfiehlt sich zum Losziehen einer festgefahrenen Rohrleitung sowie zur Reduzierung der Einziehkraft bei feinkörnigen und bindigen Baugrundbedingungen. Die Ausbildung der beschriebenen Teilverflüssigung des umgebenden Bodenmaterials erfordert einen Kontakt des Bodens mit der zur Schwingung angeregten Rohroberfläche. Gleiches gilt für thixotrope, stark Bohrklein beladene Spülungen. Besonders hier können hochfrequente Schwingungen dazu beitragen, die sog. Sol-Phase, zumindest in Teilbereichen des Ringraums (Kontaktzone zwischen Rohroberfläche und Bohrspülung), aufrecht zu erhalten und die initialen Haftfestigkeiten, die beispielsweise nach einer Unterbrechung des Spülungskreislaufs auftreten, herabzusetzen. Ferner können die Schwingungen dazu beitragen, einen verfestigten Filterkuchen zu lösen. Es kann davon ausgegangen werden, dass das Vibrationsverfahren beim Vorhandensein von Bohrspülung noch deutlichere Ergebnisse im Hinblick auf die erwünschte Zugkraftreduzierung liefert.

Mit der beschriebenen Zugkraftreduzierung geht ferner eine Vergleichmäßigung des Einziehvorgangs einher (Vermeidung von Slip-Stick-Effekten), d.h. der Übergang von der

---

Haftreibung zur Gleitreibung erfolgt ohne große Zugkraftsprünge oder Lastspitzen. Daraus resultieren eine Schonung des Rohrmaterials bzw. der Rohrverbindungsstellen einerseits und eine Herabsetzung der Beanspruchung des Widerlagers der Bohranlage beim Anziehvorgang andererseits.

Für die praxistaugliche Umsetzung des Verfahrens empfiehlt sich die Konstruktion eines Schwingungsaggregates, welches im Rohr verfahr- und verspannbar ist. Für die Anwendung des Verfahrens sollten die Schwingungen, die sich, an einem Punkt initiiert und über einen begrenzten Rohrabschnitt auswirken, zunächst abschnittsweise über den gesamten Rohrstrang eingeleitet werden. Damit wird erreicht, dass das im Baugrund zuzitzende Porenwasser in einer schmalen Kontaktzone zwischen Rohrleitung und Boden bzw. Bohrspülung mobilisiert wird und sich die beschriebene pseudoplastische Verflüssigungszone ausbilden kann. Aufgrund behinderter Drainagebedingungen, vor allem im kohäsiven Baugrund bzw. beim Vorhandensein von Bohrspülung, welche ähnliche rheologische Eigenschaften wie stark bindiges Bodenmaterial aufweist, ist, Erfahrungen/Untersuchungen zufolge (Konsolidierungsmodell von TERZAGHI), zu erwarten, dass für den Ausgleich der resultierenden Spannungen infolge des Porenwasserdruckanstiegs, die wiederum bedingt sind durch die initiierten Schwingungen, eine gewisse Zeit erforderlich ist (Stunden bis Tage). Daher kann davon ausgegangen werden, dass die pseudoplastische Gleitschicht, die die Reduzierung der erforderlichen Einziehkraft begünstigt, über einen längeren Zeitraum (entsprechend der Zeit für den Spannungsabbau) stabil bleibt. Im weiteren Verlauf sollten dann die Schwingungen gezielt dort eingebracht werden, wo maximale Haftfestigkeiten auftreten bzw. zu erwarten sind, wie beispielsweise an Stellen mit maximaler Rohrkrümmung und Kontakt zwischen Rohroberfläche und Bohrlochwand oder in Bereichen mit instabilen Bohrlochzuständen.

Die Leistung eines derartigen Schwingungsaggregates sollte in jedem Fall gewährleisten, dass die Erregerfrequenz deutlich über dem Resonanzbereich des Baugrunds liegt. Hierdurch können unerwünschte Bodenschwingungen, die ihrerseits wiederum Setzungserscheinungen oder Schäden an umliegenden Objekten hervorrufen können, vermieden werden. In der Bau- und Bohrtechnik sind verschiedene Verfahren und Systeme bekannt, mit denen diese kritischen Frequenzbereiche, insbesondere beim Hoch- und Auslauf des Vibrators, umgangen werden können. Diese lassen sich aus technischer Sicht ohne weiteres auf die hier vorliegende Anwendung übertragen. Für die großtechnische konstruktive Umsetzung eines geeigneten Schwingungsaggregates, welches den erforderlichen Anforderungen gerecht wird, empfiehlt sich die zeitnahe Kontaktaufnahme mit einer maschinenbautechnischen Einrichtung bzw. einem Industriebetrieb, deren/dessen Kernkompetenz im Bereich der Vibrationstechnik liegt.

Die im Rahmen des Forschungsprojektes durchgeführten Untersuchungen sollten einerseits die Machbarkeit des Verfahrens unter Feldbedingungen belegen und andererseits Lösungsansätze aufzeigen, auf deren Basis die großtechnische Umsetzung des Verfahrens vorgenommen

werden kann. Hierzu bleibt anzumerken, dass die exakte Abbildung realer Insitu-Verhältnisse auf den Technikumsmaßstab grundsätzlich mit Unsicherheiten behaftet ist und aufgrund der komplexen Zusammenhänge nur ansatzweise und unvollständig erfolgen kann. Gleiches gilt für Rechenmodelle, wobei hier durch Vereinfachungen versucht wird, die realen Bedingungen auf ein möglichst einfaches, mathematisch erfassbares Ersatzsystem zu reduzieren. Aus diesen Gründen kann letztlich nur ein Insitu-Versuch exakte und belastbare Erkenntnisse liefern, was für einen nächsten Entwicklungsschritt empfohlen wird.

Sollte sich das Verfahren im Feld bewähren, empfiehlt sich die Bereitstellung („Standby“) eines entsprechend dimensionierten und universell einsetzbaren Aggregates bei HDD-Vorhaben, bei denen baugrundbedingte Schwierigkeiten bei der Realisierung des Rohreinzugs zu erwarten sind.

**Abbildungsverzeichnis**

Abb. 2-1: Prinzipdarstellung der Herstellung einer Pilotbohrung beim HDD [77] .....	6
Abb. 2-2: Prinzipdarstellung der Herstellung einer Aufweitbohrung beim HDD [77].....	6
Abb. 2-3: Prinzipdarstellung des Einziehvorgangs eines Produktrohres beim HDD [77].....	7
Abb. 2-4: Verfahrenstypische Baustelleneinrichtung bei HDD-Projekten, links: Rigsite, rechts: Pipesite [39] .....	8
Abb. 2-5: HDD-Bohrgerät in Trailer-Rig-Ausführung der Fa. Herrenknecht AG [29].....	9
Abb. 2-6: Steuerstand einer HDD-Bohranlage [39].....	11
Abb. 2-7: Dieselhydraulische Hochdruck-Spülpumpe (Leistung ca. 330 kW) [39] .....	12
Abb. 2-8: Recyclinganlage für Bohrspülung [39].....	14
Abb. 2-9: Schematische Darstellung eines Bohrstrangs zur Herstellung einer Pilotbohrung.....	14
Abb. 2-10: Düsenmeißel (Jet Bit) zur Herstellung der Pilotbohrung.....	16
Abb. 2-11: Räumwerkzeuge, links: Barrel Reamer, Mitte: Fly Cutter, rechts: Hole Opener [39].....	17
Abb. 2-12: Schematische Darstellung einer Einziehgarnitur beim HDD .....	17
Abb. 2-13: Vorbereiteter und auf Rollenböcken gelagerter Rohrstrang .....	18
Abb. 2-14: Prinzipieller Aufbau eines Oberbogens [77].....	19
Abb. 2-15: Verlegeleistung des HDD-Verfahrens in Abhängigkeit von Rohrdurchmesser und Rohrlänge [39].....	20
Abb. 2-16: Grafische Ermittlung der geeigneten Bohranlagengröße in Abhängigkeit von Rohrdurchmesser und Bohrungslänge [39] .....	23
Abb. 2-17: Rettungsversuch einer feststeckenden Pipeline mit Bergungskränen [36].....	24
Abb. 2-18: Typische Zugkraftverläufe während des Einziehens einer Rohrleitung [39] .....	26
Abb. 3-1: Verschiedene Arten von Biegeschwingungen eines Rohres.....	29
Abb. 3-2: Dämpfungseffekte bei Rohrleitungsschwingungen .....	32
Abb. 3-3: Dämpfungsmaß $\xi$ (Lehrsches Dämpfungsmaß) in Abhängigkeit der Eigenfrequenz ..	33
Abb. 3-4: Korngrößendiagramm mit typischen Körnungslinien .....	35
Abb. 3-5: Durchlässigkeit von Böden in Abhängigkeit der Korngröße, Kugelmodell.....	39
Abb. 3-6: Spannungskomponenten eines Elementarquaders .....	40
Abb. 3-7: Zeitsetzungsverhalten von Lockergesteinen .....	42
Abb. 3-8: $\tau$ - $\gamma$ Diagramm der Scherbeanspruchung .....	43
Abb. 3-9: Mohr-Coulomb'sche Grenzbedingung für einen bindigen und nichtbindigen Boden.....	44
Abb. 3-10: Einflussgrößen auf das Schwingungsverhalten des Rüttler-Boden-Systems.....	46
Abb. 3-11: Verflüssigungsgefährdete Kornverteilungsbereiche [42] .....	50
Abb. 3-12: Abschätzung der Verflüssigungsneigung in Abhängigkeit der Lagerungsdichte.....	51
Abb. 3-13: Reduktionsfaktor $r_d$ in Abhängigkeit der Teufe.....	52
Abb. 3-14: Wirkungsbereiche der Adhäsion bei bindigen Böden .....	54

---

Abb. 3-15: Geschwindigkeitsspezifische Korrektur .....	56
Abb. 3-16: Sol-Gel-Bildungsmechanismus bei Bohrspülungen [15].....	62
Abb. 3-17: Fließverhalten verschiedener Flüssigkeiten .....	63
Abb. 4-1: Vibrationsbär einer Spundwandramme.....	67
Abb. 4-2: Funktionsprinzip der Vibrationsrammung .....	68
Abb. 4-3: Pipe Vibration - Vibrationseinheit zum Lösen eines festsitzenden Vertikalbohrstranges [79] .....	71
Abb. 4-4: Mechanismus des Differential Pressure Sticking .....	72
Abb. 4-5: Aufbau und Wirkungsweise (Trichterbildung an der Geländeoberfläche) eines Tiefenrüttlers .....	74
Abb. 6-1: Aufbau der Pilotversuchsanlage .....	79
Abb. 6-2: Quer zur Zugrichtung heckseitig auf dem Rohr installierter Turbinenvibrator .....	79
Abb. 6-3: Vergleich der Losbrechkraftlinien mit und ohne Vibrationseinleitung im Pilotversuch .....	80
Abb. 6-4: Zugkraftkurve bei intervallmäßigem Initiieren von Schwingungen (Gleitkraft).....	81
Abb. 6-5: Zugkraftkennlinie und Vibrationseffekte im Tonboden (Verflüssigungserscheinungen) .....	81
Abb. 7-1: Körnungslinie des verwendeten Modellsandes.....	86
Abb. 8-1: Aufbau der Versuchsanlage .....	92
Abb. 8-2: Pneumatische Hebekissen zur Simulation des Insitu-Überlagerungsdrucks .....	93
Abb. 8-3: Rollenbock zur Aufnahme der Rohrenden .....	94
Abb. 8-4: Heckseitige Rohrführung mit Einrichtungen zur Hydraulikversorgung und Messtechnik .....	94
Abb. 8-5: Antriebseinheit der Seilzugvorrichtung .....	95
Abb. 8-6: Spilltrommel .....	95
Abb. 8-7: Heckseitige Seilspannvorrichtung .....	95
Abb. 8-8: Konstruktionszeichnung der pneumatischen rohrinternen Vibrationseinheit.....	96
Abb. 8-9: Fertig zusammengebaute pneumatische Vibrationseinheit.....	96
Abb. 8-10: Standard Elektro-Innenvibrator, NetterVibration .....	98
Abb. 8-11: 100 kN Zugkraftmessdose .....	99
Abb. 8-12: Elektrischer Endschalter .....	100
Abb. 8-13: Metallgitterkäfig und Treppenübergang .....	100
Abb. 9-1: Exemplarische Messkurve eines Zugversuchs im Sand mit erkennbarem Vibrationseffekt .....	102
Abb. 9-2: Reduzierung der initialen Losbrechkraft und Gleitreibung durch Schwingungseinleitung sowie der Wechsellast beim Einziehvorgang .....	103
Abb. 9-3: Exemplarische Messwertkurve eines Zugversuchs mit unterschiedlichen Einziehgeschwindigkeiten .....	104
Abb. 9-4: Abhängigkeit der Einziehkraft von der Vibratorleistung, Auflast 200 kN/m <sup>2</sup> .....	106

---

Abb. 9-5: Abhängigkeit der Einziehkraft von der Vibratorleistung, Auflast 400 kN/m <sup>2</sup> .....	106
Abb. 9-6: Abhängigkeit der Losbrechkraft von der statischen Auflast.....	108
Abb. 9-7: Abhängigkeit der Gleitkraft von der statischen Auflast .....	108
Abb. 9-8: Abhängigkeit der Losbrechkraft von der Rohrgeometrie, Auflast 200 kN/m <sup>2</sup> .....	111
Abb. 9-9: Abhängigkeit der Gleitkraft von der Rohrgeometrie, Auflast 200 kN/m <sup>2</sup> .....	111
Abb. 9-10: Abhängigkeit der Losbrechkraft von der Rohrgeometrie, Auflast 400 kN/m <sup>2</sup> .....	112
Abb. 9-11: Abhängigkeit der Gleitkraft von der Rohrgeometrie, Auflast 400 kN/m <sup>2</sup> .....	112
Abb. 9-12: Gegenüberstellung der Messwerte für die Losbrechkraft in Abhängigkeit der Rohrmanteloberfläche .....	117
Abb. 9-13: Gegenüberstellung der Messwerte für die Gleitkraft in Abhängigkeit der Rohrmanteloberfläche und statischen Auflast .....	117
Abb. 9-14: Gegenüberstellung der Messwerte für die Losbrechkraft in Abhängigkeit der Rohrmanteloberfläche und des Schwingungseintrags .....	119
Abb. 9-15: Gegenüberstellung der Messwerte für die Gleitkraft in Abhängigkeit der Rohrmanteloberfläche und des Schwingungseintrags .....	119
Abb. 9-16: Gegenüberstellung der Messwerte für die Losbrechkraft in Abhängigkeit des Baugrunds und des Schwingungseintrags, Auflast 200 kN/m <sup>2</sup> .....	122
Abb. 9-17: Gegenüberstellung der Messwerte für die Gleitkraft in Abhängigkeit des Baugrunds und des Schwingungseintrags, Auflast 200 kN/m <sup>2</sup> .....	122
Abb. 9-18: Gegenüberstellung der Messwerte für die Losbrechkraft in Abhängigkeit des Baugrundes und des Schwingungseintrags, Auflast 400 kN/m <sup>2</sup> .....	123
Abb. 9-19: Gegenüberstellung der Messwerte für die Gleitkraft in Abhängigkeit des Baugrundes und des Schwingungseintrags, Auflast 400 kN/m <sup>2</sup> .....	123
Abb. 9-20: Maximal erreichte Zugkraftdifferenzen in Abhängigkeit des Schwingungseintrags und Bodenmaterials, DN200 PE-ummanteltes Stahlrohr, Auflast 200 kN/m <sup>2</sup> .....	125
Abb. 9-21: Maximal erreichte Zugkraftdifferenzen in Abhängigkeit des Schwingungseintrags und Bodenmaterials, DN200 PE-ummanteltes Stahlrohr, Auflast 400 kN/m <sup>2</sup> .....	125
Abb. 9-22: Feinkornablagerungen in der Umgebung des Testrohres .....	126
Abb. 9-23: Verflüssigungserscheinungen nach Vibrationseintrag im bindigen Modellboden ...	127
Abb. 9-24: Abhängigkeit der Einziehkraft von der Vibratorposition innerhalb des Materialkastens .....	128
Abb. 11-1: Biegespannungsverteilung als Ergebnis der FE-Modellierung für den betrachteten Lastfall .....	140
Abb. 11-2: Biegevergleichsspannung (von Mises) und Deformation für den betrachteten Lastfall.....	141
Abb. 11-3: Beidseitig eingespannter Biegebalken mit Punktlast, Modelldarstellung [8] .....	142
Abb. 12-1: Schematische Darstellung von Bohrlochabschnitten zur Zugkraftabschätzung .....	145

Abb. 12-2: Mechanisches Ersatzmodell der Rüttlerbewegung .....	149
Abb. 12-3: Bodenreaktionskraft auf das Rüttlersystem .....	151
Abb. 12-4: Grundprinzip des Gerichteten Vibrierens .....	153
Abb. 12-5: Statisches Moment des Schwingungserregers und Einfluss auf die Amplitude .....	154
Abb. 12-6: Antriebsprinzip der rotierenden Kurbelschleife.....	155
Abb. 12-7: Antriebsprinzip mit unterschiedlich schnell rotierenden Unwuchtpaaren.....	156



## Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1: Übliche Klassifizierung von HDD-Bohrgeräten [77].....	10
Tab. 3-1: Richtwerte für Dämpfungsparameter .....	34
Tab. 3-2: Bezeichnung der Lagerungsdichten.....	38
Tab. 3-3: Charakteristische Eigenfrequenzen ausgewählter Lockergesteine.....	47
Tab. 3-4: Adaptionsbeiwerte für ausgewählte Lockergesteine .....	57
Tab. 7-1: Bodenmechanische Parameter des verwendeten Modellsandes .....	86
Tab. 7-2: Kennwerte der Versuchsrohre .....	87
Tab. 8-1: Errechnete Betriebsdaten des pneumatischen Innenvibrators .....	97
Tab. 8-2: Errechnete Betriebsdaten des elektrischen Innenvibrators .....	98
Tab. 9-1: Messwerte der Zugkraftänderung in Abhängigkeit der statischen Auflast .....	109
Tab. 9-2: Messwerte der Zugkraftänderung in Abhängigkeit der Rohrgeometrie, Auflast 200 kN/m <sup>2</sup> .....	113
Tab. 9-3: Messwerte der Zugkraftänderung in Abhängigkeit der Rohrgeometrie, Auflast 400 kN/m <sup>2</sup> .....	114
Tab. 9-4: Messwerte der Zugkraftreduzierung in Abhängigkeit der Einziehgeschwindigkeit im Sandboden.....	115
Tab. 9-5: Messwerte der Zugkraftreduzierung in Abhängigkeit der Einziehgeschwindigkeit im Schluffboden.....	116
Tab. 9-6: Messwerte der Zugkraftreduktion in Abhängigkeit der Rohrummantelung und Auflast .....	118
Tab. 9-7: Messwerte der Zugkraftreduktion in Abhängigkeit der Rohrummantelung und Vibrationsfrequenz.....	120
Tab. 11-1: Technische Daten und Vorgaben zur Durchführung des Festigkeitsnachweises .....	137

**Literaturverzeichnis**

---

[1]	ABI GMBH (2005)	Firmenunterlagen - Verfahrensbeschreibung Vibrierendes Rammen.  Niedernberg, Stand Oktober 2005
[2]	ADINOLFI, L. (2006)	HDD im Grenzbereich.  bi UmweltBau 6/2006, S. 16 - 18
[3]	BAUER GMBH (2002)	Firmenunterlagen - Verfahrensbeschreibung Spundwandverfahren.  Schrobenhausen, Stand November 2002
[4]	BAUER GMBH (2004)	Firmenunterlagen - Verfahrensbeschreibung Tiefenrüttelverfahren.  Schrobenhausen, Stand März 2004
[5]	BAUER GMBH (2007)	Werbeprospekt Aufsatzvibratoren Schrobenhausen, 2007
[6]	BAYER, H.-J. (2005)	HDD-Praxis Handbuch.  1. Aufl., Vulkan Verlag, Essen 2005
[7]	BAYER, H.-J.; LENZ, J. ET. AL. (2003)	Bohrspülungen im HDD.  1. Aufl., Vulkan Verlag, Essen 2003
[8]	BEITZ, W.; KÜTTNER, K.-H. (1995)	Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau.  18. Auflage, Springer Verlag, Berlin 1995
[9]	BERNAT, B.; BERNAT H. (1997)	Mechanical oscillator frees stuck pipe strings using resonance technology.  Oil & Gas Journal, Heft 11/1997, S. 68 – 71
[10]	BEYERT, J. (2006)	Rohrvortrieb - Qualitätssicherung durch Online-Überwachung der Rohrbelastung.  RWTH Aachen, Lehrstuhl für Baubetrieb und Projektmanagement

---

- 
- |   |  |
|---|--|
| [11] BEYERT, J.; BOHLE, U.<br>(2005)                | Schäden vermeiden - Online-Überwachung der Vorpresskraft<br>beim Rohrvortrieb.<br><br>Steinzeug-Information, 2005, S. 27 - 31                              |
| <hr/>   |  |
| [12] DEUTSCHE NORM (2000)                           | DIN EN 1594 - Rohrleitungen für einen maximal zulässigen<br>Betriebsdruck über 16 bar.<br><br>Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), Berlin, 2000      |
| <hr/>   |  |
| [13] DEUTSCHE NORM (2001)                           | DIN 4150-1 - Erschütterungen im Bauwesen.<br><br>Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), Berlin, 2001   |
| <hr/>   |  |
| [14] DIETRICH, J. (2007)                            | Selbsterhärtende Bohrspülungen für das HDD-Verfahren.<br><br>bi UmweltBau 2/2007, S. 24 - 26   |
| <hr/>   |  |
| [15] DONNER, G. (2004)                              | Sol-Gel-Übergänge in Tonmineraldispersionen.<br><br>Dissertationsschrift, Universität Kiel,<br>Kiel, 2004  |
| <hr/>   |  |
| [16] DOBRINSKI, P.; KRAKAU, G.;<br>VOGEL, A. (1996) | Physik für Ingenieure.<br><br>9. Aufl., Teubner – Verlag, Stuttgart 1996   |
| <hr/>   |  |
| [17] DREES, G. (2002)                               | 100 Jahre Spundwandbauweise - Spundwandprofile und<br>Rammgeräte effektiv eingesetzt.<br><br>Tiefbau 6/2006, S. 312 - 317                                  |
| <hr/>   |  |
| [18] ERNST, U. (2000)                               | Schadensursachen bei der Herstellung von Bohrpfählen im<br>Grundwasser.<br><br>Dissertationsschrift, TU Braunschweig,<br>Braunschweig, 2000                |
| <hr/>   |  |
| [19] FALTER, B.; STROTMANN, A.<br>(2006)            | Beanspruchungen und Verformungen in zugfesten<br>Gussrohrverbindungen beim grabenlosen Auswechseln.<br><br>3R international 45, Heft 6/2006, S. 271 - 278  |
| <hr/>   |  |
| [20] FELLIN, W (2000)                               | Rütteldruckverdichtung als plastodynamisches Problem;<br>Advances in Geotechnical Engineering and Tunneling.<br><br>A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield/2000 |
-

- 
- |  |   |
|--|---|
| [21] FELLIN, W.;<br>HOCHENWARTER, G.; GEIß,<br>A. (2002) | On-line Verdichtungskontrolle bei der<br>Rütteldruckverdichtung.<br><br>Messen in der Geotechnik 2002, Heft 68, S. 87-106 |
|--|---|
- 
- |                         |  |
|-------------------------|--|
| [22] FISCHER, M. (2001) | Dreidimensionale numerische Simulation<br>strömungsinduzierter Rohrbündelschwingungen.<br><br>Dissertationsschrift, TU München,<br><br>München, 2001 |
|-------------------------|--|
- 
- |                         |  |
|-------------------------|--|
| [23] GÄRTNER, G. (2001) | Kriechbewegungen und deren Überwachung am Beispiel der<br>Böschungsrutschung im Absetzerloch 13 des ehemaligen<br>Braunkohlentagebaus Zwenkau.<br><br>Dissertationsschrift, TU Braunschweig,<br><br>Braunschweig, 2001 |
|-------------------------|--|
- 
- |                       |   |
|-----------------------|---|
| [24] GRABE, J. (2005) | Finite-Elemente-Analyse zur Vibrationsrammung von<br>Pfählen.<br><br>Bautechnik 82, Heft 9/2005, S. 632-640 |
|-----------------------|---|
- 
- |                       |   |
|-----------------------|---|
| [25] HAAKH, F. (2006) | Berechnung der Biegelinie und der maßgebenden<br>Schnittkräfte beim Einschwimmen von Rohrleitungen zur<br>Sanierung von Trinkwasserstollen.<br><br>GWF 147, Nr. 1, 2006 |
|-----------------------|---|
- 
- |                       |   |
|-----------------------|---|
| [26] HAUPT, W. (1986) | Bodendynamik – Grundlagen und Anwendungen.<br><br>1. Aufl., Vieweg – Verlag, Braunschweig, 1986 |
|-----------------------|---|
- 
- |                        |  |
|------------------------|--|
| [27] HERBST, J. (2003) | Anregung und Messung von Eigenschwingungen zur<br>Beurteilung der Bettungsbedingungen von erdverlegten<br>Abwasserrohren.<br><br>tm - Technisches Messen, 2003 |
|------------------------|--|
- 
- |                        |   |
|------------------------|---|
| [28] HERBST, J. (2004) | Zerstörungsfreie Prüfung von Abwasserkanälen mit<br>Klopfschall.<br><br>Dissertationsschrift, Universität Karlsruhe,<br><br>Karlsruhe, 2004 |
|------------------------|---|
- 
- |                             |  |
|-----------------------------|--|
| [29] HERRENKNECHT AG (2004) | HDD Rigs: Optimum Pullforce<br><br>Firmenprospekt, Schwanau, 10/2004 |
|-----------------------------|--|
- 
-

- 
- |                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| [30] JARMER, D. (2002)                | Zur Erregung mechanischer Rohrleitungsschwingungen durch oszillierende Verdrängerpumpen - Numerische Berechnung und experimentelle Verifikation.<br><br>Dissertationsschrift, Universität Erlangen - Nürnberg, Erlangen, März 2002 |
| <hr/>                                 |  |
| [31] JOHN, H.-J. (2007)               | Unterlagen zur Vorlesung Design, Bau und Sanierung von Versorgungsleitungen.<br><br>TU Clausthal, 2007   |
| <hr/>                                 |  |
| [32] KACHE, G.; KOLLMANN, T. (2005)   | Wandreibungsverhalten hochdispenser, kohäsiver Pulver unter Schwingungseinwirkung.<br><br>Wissensportal baumaschine.de, 2/2005   |
| <hr/>                                 |  |
| [33] KIELHORN, L. (2004)              | Modellierung von Wellenausbreitung in porösen Böden: Dimensionslose Variablen für eine Randelementformulierung<br><br>Diplomarbeit, TU Braunschweig, Braunschweig, 2004  |
| <hr/>                                 |  |
| [34] KLEIBL, A. (2005)                | Theoretische und experimentelle Untersuchungen des Wirkprinzips Gerichtetes Rütteln.<br><br>Dissertationsschrift: TU Bergakademie Freiberg, Freiberg, 2005   |
| <hr/>                                 |  |
| [35] KLEISER, K.; BAYER, H.-J. (1996) | Der grabenlose Leitungsbau.<br><br>Schriftenreihe Energie- und Umwelttechnik, Vulkan Verlag, Essen, 1996   |
| <hr/>                                 |  |
| [36] KÖGLER, R.; GÄNGER, J. (2000)    | Ultralange Horizontalbohrungen - Eine neue Herausforderung an das Horizontal Directional Drilling.<br><br>3R international, Heft 6, 2000, S. 349 - 352   |
| <hr/>                                 |  |
| [37] KÖGLER, R. (2001)                | Risikoschwerpunkte beim Horizontal Directional Drilling.<br><br>bi UmweltBau 6/2001, S. 18 - 22  |
| <hr/>                                 |  |
| [38] KÖGLER, R.; LÜBBERS, H. (2001)   | Dimensionierung von Bohrgeräten für gesteuerte Horizontalbohrungen<br><br>bi UmweltBau 5/2001  |
-

- 
- |                        |  |
|------------------------|--|
| [39] KÖGLER, R. (2007) | Unterlagen zur Vorlesung Spezialbohrtechnik.<br>TU Clausthal, 2007 |
|------------------------|--|
- 
- |                        |  |
|------------------------|--|
| [40] KREIBL, A. (2004) | Gerichtetes Vibrieren - ein innovatives Rammverfahren.<br>Wissensportal baumaschine.de, 2/2004 |
|------------------------|--|
- 
- |                        |  |
|------------------------|--|
| [41] KREIBL, A. (2007) | Vibrationsrammen - Theoretische Grundlagen des<br>Gerichteten Vibrierens & erste Erfahrungen.<br>ABI GmbH, Niedernberg |
|------------------------|--|
- 
- |  |  |
|--|--|
| [42] KTA - KERntechnischer<br>Ausschuss (1990) | Sicherheitstechnische Regeln des KTA -KTA 2201.2:<br>„Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische<br>Einwirkungen, Teil 2: Baugrund“<br>Fassung 06/1990 |
|--|--|
- 
- |                      |   |
|----------------------|---|
| [43] LIEB, M. (1997) | Adaptive numerische Fouriertransformation in der<br>Bodendynamik unter Verwendung der Waveletzerlegung.<br>Dissertationsschrift, TU München,<br>München, 1997 |
|----------------------|---|
- 
- |                        |   |
|------------------------|---|
| [44] LUX, K. H. (2003) | Unterlagen zur Vorlesung Geomechanik I + II<br>TU Clausthal, 2003 |
|------------------------|---|
- 
- |                         |  |
|-------------------------|--|
| [45] MIELENZ, P. (2004) | Bentonite/Polymere - Bohrspülungen in der Vertikal- und<br>HDD-Technik.<br>bbr Sonderdruck, Ausg. 3/2004 |
|-------------------------|--|
- 
- |                           |   |
|---------------------------|---|
| [46] MOBLEY, K. R. (1999) | Vibration Fundamentals.<br>Newnes, Butterworth-Heinemann, USA, 1999 |
|---------------------------|---|
- 
- |                        |   |
|------------------------|---|
| [47] NENDZA, M. (2006) | Untersuchungen zu den Mechanismen der dynamischen<br>Bodenverdichtung bei Anwendung des<br>Rütteldruckverfahrens.<br>Dissertationsschrift, Universität Braunschweig,<br>Braunschweig, Dezember 2006 |
|------------------------|---|
- 
- |                             |  |
|-----------------------------|--|
| [48] NETTERVIBRATION (2006) | Firmenunterlagen - Broschüre Netter Druckluft-<br>Turbinenvibratoren Serie NCT.<br>Mainz-Kastel, Stand Juli/2006 |
|-----------------------------|--|
- 
-

- 
- [49] NETTERVIBRATION (2006) Firmenunterlagen - Broschüre Netter Elektro-Innenvibratoren Serie NCZ.  
Mainz-Kastel, Stand August/2006
- 
- [50] NIEMUNIS, A. (2006) Über die Anwendung der Kontinuumstheorie auf bodenmechanische Probleme. Eine Vorlesung für Grundbau- und Tunnelbauvertiefer.  
Vorlesungsunterlagen, Universität Bochum, Bochum, 2006
- 
- [51] PAIN, H. J. (2005) The Physics of Vibrations and Waves.  
6<sup>th</sup> Edition, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, West Sussex, England, 2005
- 
- [52] PHRIKOLAT DRILLING SPECIALTIES GMBH (2007) Firmenunterlagen - Bentonitsuspensionen als Stütz- und Gleitmittel für den Rohrvortrieb.  
www.phrikolat.de
- 
- [53] PLACZEK, D. (2007) Baugrundrisiko beim Rohrvortrieb.  
tis 1-2/2007, Essen
- 
- [54] PROSONIC CORP. (2007) Firmenunterlagen - Prospektmaterial  
www.prosoniccorp.com
- 
- [55] RAJU, V. (1994) Spontane Verflüssigung lockerer granularer Körper - Phänomene, Ursachen, Vermeidung.  
Dissertationsschrift, Universität Karlsruhe, Karlsruhe 1994
- 
- [56] REICH, M. (2003) Untersuchung komplexer Bohrgarnituren mit integriertem, schaltbarem Erweiterungswerkzeug.  
Dissertationsschrift, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg, 2003
- 
- [57] RICHWIEN, W. (2001) Unterlagen zur Vorlesung Bodenmechanik.  
Universität Essen, 2001
- 
- [58] RÖHRENWERK GEBR. FUCHS GMBH (2002) Firmenunterlagen - Das Stahlrohr in der grabenlosen Leitungsverlegung.  
Siegen, 2002
-

- 
- [59] SCHMIDT, R. (2006)      Unterlagen zur Vorlesung Grundlagen der Schwingungsanalyse.  
Fachhochschule Osnabrück, 2006
- 
- [60] SCHUMACHER, L. (2004)      Die Mantelreibung - leistungsbestimmender Parameter bei verrohrten Großlochbohrungen im Lockergestein.  
Bautechnik 81 (2004), Heft 5, S. 364 - 370
- 
- [61] SELLE, O.; THIELE, R. (2003)      Erdverlegte Druckrohrleitungen aus Kunststoff – Untersuchungen zu verlegebedingten Beanspruchungen.  
Leipzig, 2003
- 
- [62] SIMS, M. R.; PARNELL, J. (2003)      Ultrasonic drilling as a tool in planetary exploration.  
Geophysical Research Abstracts, Vol. 5, 14421, European Geophysical Society, 2003
- 
- [63] SMOLTCZYK, U. (2001)      Grundbau – Taschenbuch.  
Teil 2: Geotechnische Verfahren.  
6. Aufl., Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2001
- 
- [64] SONIC DRILL CORP. (2007)      Firmenunterlagen - Prospektmaterial  
[www.sonic-drill.com](http://www.sonic-drill.com)
- 
- [65] STAHLMANN, J.; KLUGE, K.; GATTERMANN, J. (2005)      Theoretische und experimentelle Erkenntnisse zur Bodenverflüssigung bei Offshore-Windenergieanlagen.  
HTG-Kongress 2005
- 
- [66] STAHLMANN, J.; KLUGE, K. (2005)      Theoretische Überlegungen zur Porenwasserdruckausbildung im Gründungsbereich von Offshore-Pfählen.  
Forschungszentrum Küste, Tagungsband,  
5. FZK-Kolloquium, März 2005
- 
- [67] STEIN, D. (2003)      Grabenloser Leitungsbau.  
1. Aufl., Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2003
- 
- [68] STUDER, J.; KOLLER, M. (1997)      Bodendynamik – Grundlagen, Kennziffern, Probleme.  
2. Aufl., Springer-Verlag, Berlin, 1997
- 
- [69] STUDER, J. (2000)      Erschütterungseinwirkungen auf Bauwerke.  
Fachveranstaltung: Erschütterungen und Körperschall: eine bautechnische Herausforderung, Schweiz, 2000
-

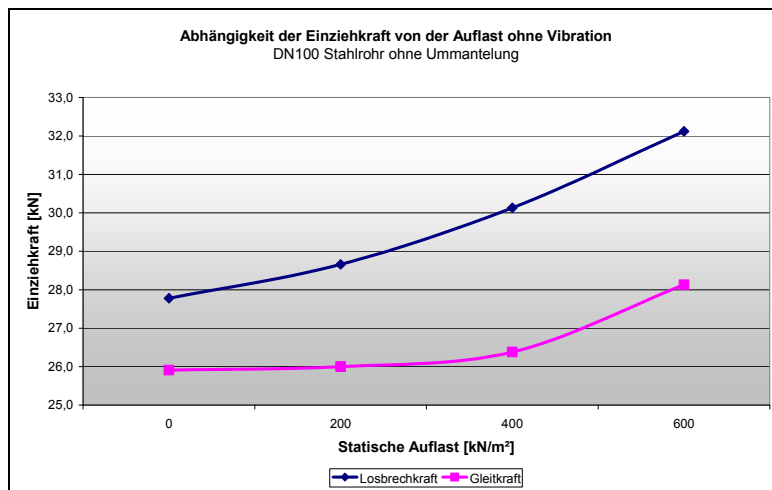


- 
- |  |   |
|--|---|
| [70] TYSEEN KRUPP GfT<br>BAUTECHNIK (2007) | Spundwandhandbuch - Berechnung.<br>ThyssenKrupp GfT Bautechnik GmbH, HSP Hoesch<br>Spundwand und Profil GmbH, Hamburg, 2007 |
|--|---|
- 
- |                                 |   |
|---------------------------------|---|
| [71] TRIANTAFYLLIDIS, T. (2003) | Bodenverflüssigung infolge zyklischer Belastung.<br>Geolex, Zeitschrift für Tiefbau und Tiefbaurecht,<br>Heft 2/2003, S. 5-20 |
|---------------------------------|---|
- 
- |                          |  |
|--------------------------|--|
| [72] TUDESHKI, H. (1993) | Ermittlung repräsentativer, für die Standsicherheit von<br>Tagebauböschungen maßgeblicher Scherparameter von<br>Tonen.<br><br>Dissertationsschrift, RWTH Aachen,<br>Aachen, 1993 |
|--------------------------|--|
- 
- |   |  |
|---|--|
| [73] TUDESHKI, H.; ROßBACH, S.;<br>LÜBBERS, H. (2007) | Rohreinziehkräfte bei gesteuerten Horizontalbohrungen –<br>Reduzierung durch Schwingungseinleitung?<br><br>Tagungsband 21. Oldenburger Rohrleitungsforum 2007,<br>„Rohrleitungen – Erfordern Ingenieurkompetenz“.<br>IRO – Schriftenreihe Band 31, Vulkan-Verlag, Essen, 2007,<br>S. 275-285 |
|---|--|
- 
- |   |  |
|---|--|
| [74] TUDESHKI, H.; ROSSBACH,<br>S. (2004) | DCA-Förderpreis 2004 – Untersuchungen zur Optimierung<br>de Einziehvorganges von Rohrleitungen mittels HDD-<br>Verfahren – Endbericht<br><br>TU Clausthal 2004 |
|---|--|
- 
- |                         |  |
|-------------------------|--|
| [75] TUNG, H.-S. (2002) | Beitrag zur dreidimensionalen numerischen Berechnung der<br>Wellenausbreitung und –abschirmung im elastischen<br>Halbraum.<br><br>Dissertationsschrift, RWTH Aachen,<br>Aachen, 2002 |
|-------------------------|--|
- 
- |                       |  |
|-----------------------|--|
| [76] URBAN, D. (2007) | Vibrationstechnologie - ein neuer Trend in der Bohrtechnik?<br><br>bbr 04/2007, S. 34 - 43 |
|-----------------------|--|
- 
- |   |  |
|---|--|
| [77] VERBAND GÜTESCHUTZ<br>HORIZONTALBOHRUNGEN<br>E.V. (DCA) (2000) | Horizontal Directional Drilling - Technische Richtlinien des<br>DCA, Informationen und Empfehlungen für Planung, Bau<br>und Dokumentation von HDD-Projekten.<br>2. Auflage, Oktober 2000 |
|---|--|
- 
-

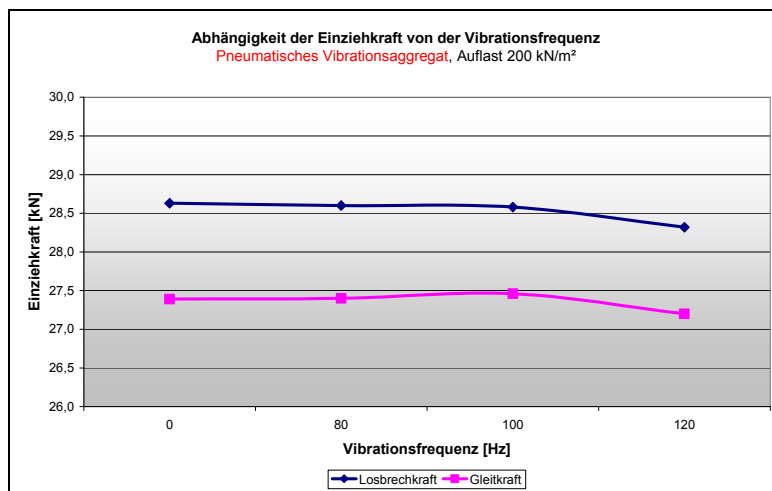
- 
- |                          |   |
|--------------------------|---|
| [78] VDI BERICHTE (1989) | Minderung von Rohrleitungsschwingungen. Vorgehen -<br>Maßnahmen - Grenzen.<br><br>Aufsatzsammlung, VDI Verlag, Düsseldorf, 1989 |
|--------------------------|---|
- 
- |  |  |
|--|--|
| [79] VIBRATION TECHNOLOGY<br>INC. (2006) | Firmenunterlagen - Pipe Vibration Technology<br><br><a href="http://www.vibrationtechnology.com">www.vibrationtechnology.com</a> |
|--|--|
- 
- |                         |   |
|-------------------------|---|
| [80] WIRTH GMBH (HRSG.) | Bohrtechnisches Handbuch.<br><br>9. Aufl., Erkelenz, 2002 |
|-------------------------|---|
- 
- |                        |  |
|------------------------|--|
| [81] WIRTH GMBH (2007) | Firmenunterlagen - Richtbohranlagen für grabenlose<br>Leitungsverlegung.<br><br>Erkelenz, 2007 |
|------------------------|--|
- 
- |  |  |
|--|--|
| [82] ZILCH, K.; DIEDERICH, C.-<br>J.; KATZENBACH, R. (HRSG.)<br>(2002) | Handbuch für Bauingenieure.<br><br>1. Aufl., Springer – Verlag, Berlin, 2002 |
|--|--|
- 
- |                            |   |
|----------------------------|---|
| [83] ZIMMERMANN, T. (2003) | Beitrag zur numerischen und experimentellen Untersuchung<br>von liegenden, sattelgelagerten Zylinderschalen unter<br>vertikaler dynamischer Belastung.<br><br>Dissertationsschrift, RWTH Aachen, Aachen, 2003 |
|----------------------------|---|
-

## **Anlagen**

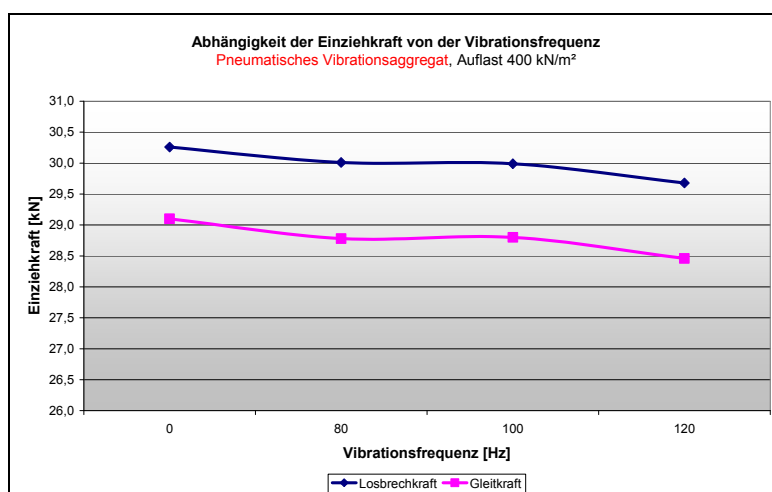
- Anlage I**      Dokumentation der Zugversuche - DN100 Stahlrohr ohne Ummantelung
- Anlage II**     Dokumentation der Zugversuche - DN100 PE-ummanteltes Stahlrohr
- Anlage III**    Dokumentation der Zugversuche - DN150 PE-ummanteltes Stahlrohr
- Anlage IV**    Dokumentation der Zugversuche - DN200 PE-ummanteltes Stahlrohr



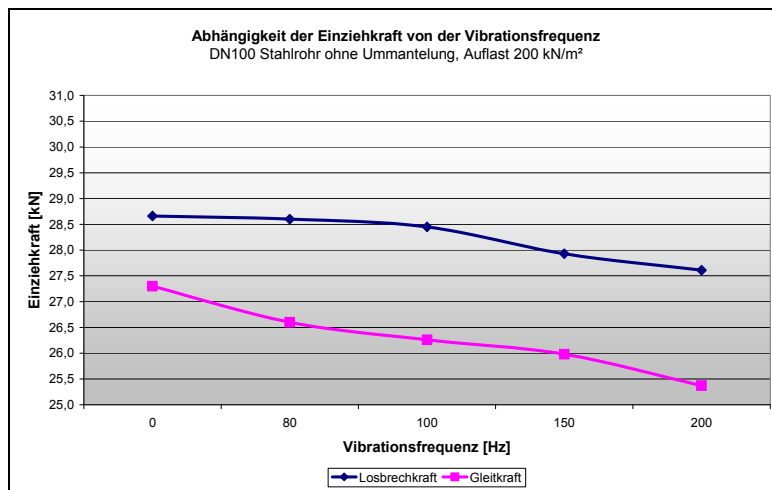
Abhängigkeit der Einziehkraft von der statischen Auflast ohne Vibration beim DN100 Stahlrohr ohne Ummantelung



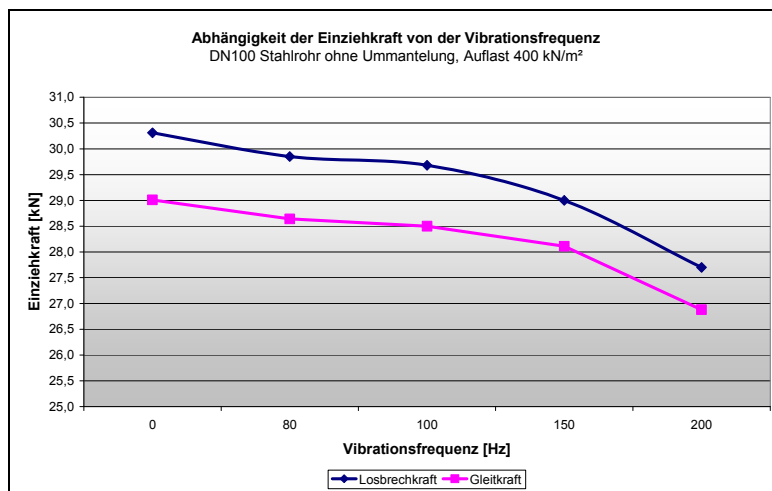
Abhängigkeit der Einziehkraft von der Vibrationsfrequenz beim pneumatischen Schwingungsaggregat, statische Auflast 200 kN/m², DN100 Stahlrohr ohne PE-Ummantelung



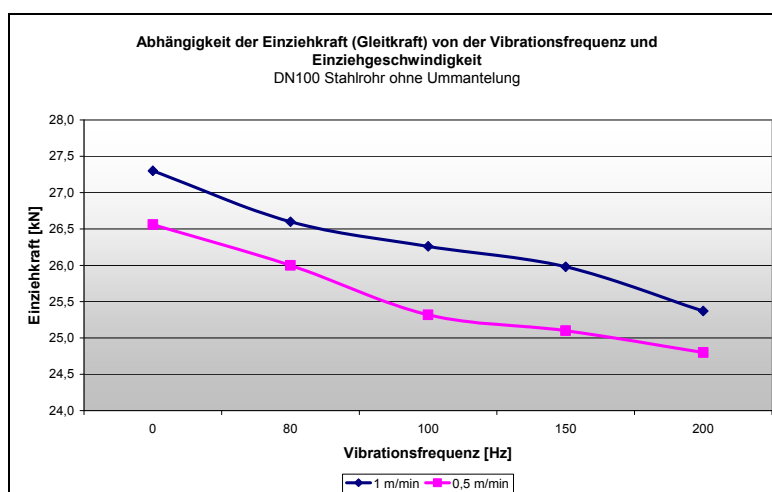
Abhängigkeit der Einziehkraft von der Vibrationsfrequenz beim pneumatischen Schwingungsaggregat, statische Auflast 400 kN/m², DN100 Stahlrohr ohne PE-Ummantelung



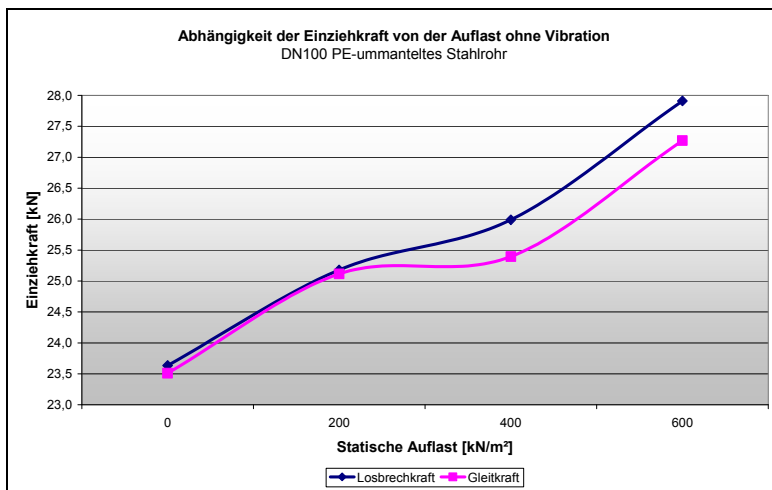
Abhängigkeit der Einziehungskraft von der Vibrationsfrequenz bei statischer Auflast von 200 kN/m<sup>2</sup> beim DN100 Stahlrohr ohne Ummantelung



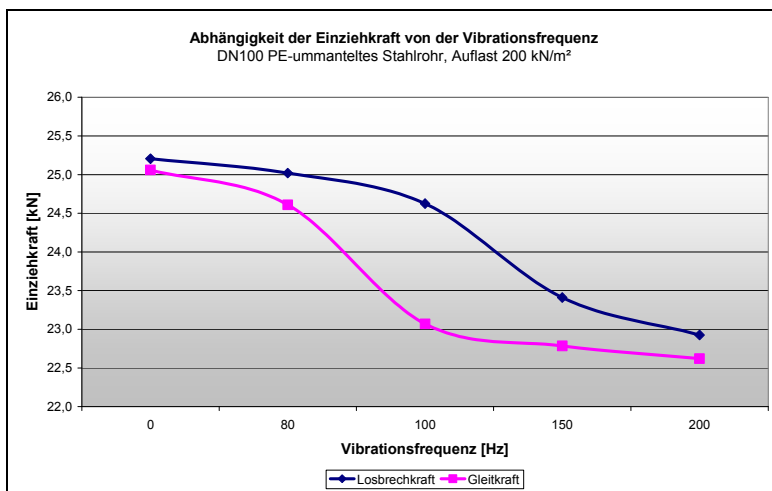
Abhängigkeit der Einziehungskraft von der Vibrationsfrequenz bei statischer Auflast von 400 kN/m<sup>2</sup> beim DN100 Stahlrohr ohne Ummantelung



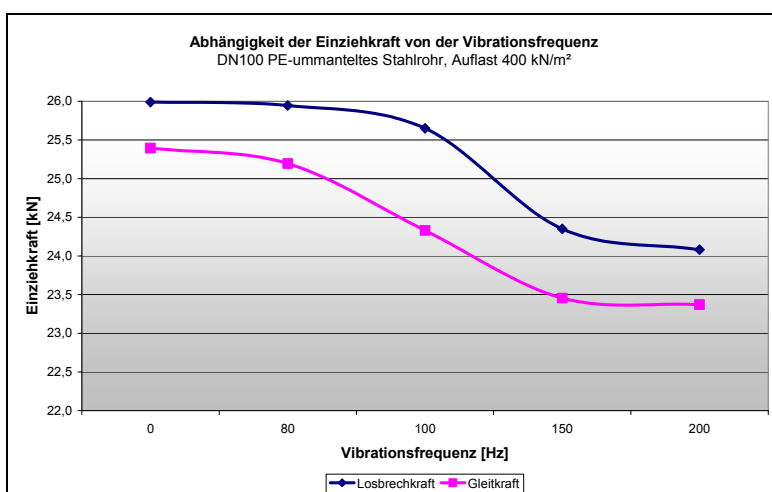
Abhängigkeit der Einziehungskraft (Gleitkraft) von der Einziehgeschwindigkeit beim DN100 Stahlrohr ohne Ummantelung



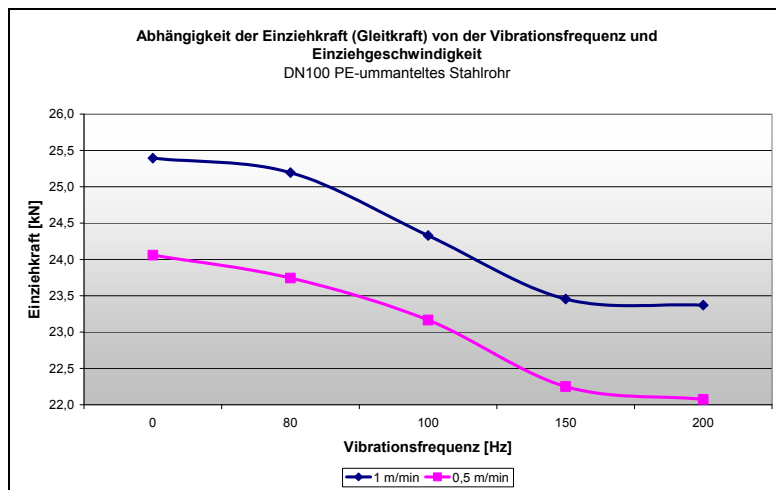
Abhängigkeit der Einziehkraft von der statischen Auflast ohne Vibration beim DN100 PE-ummantelten Stahlrohr



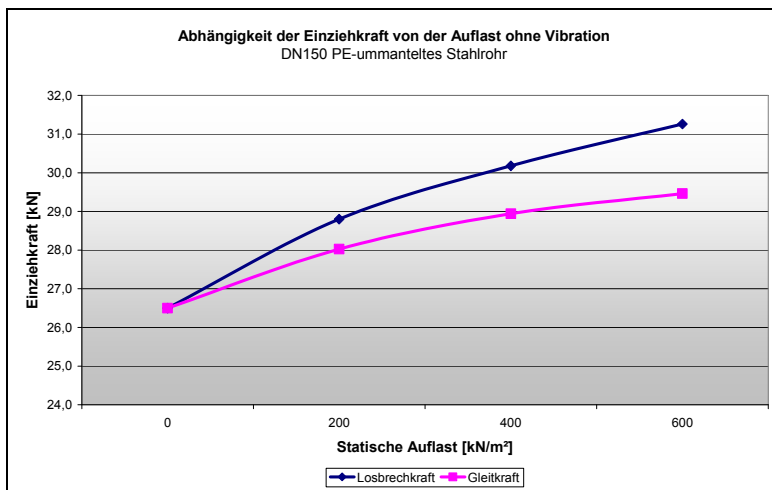
Abhängigkeit der Einziehkraft von der Vibrationsfrequenz bei statischer Auflast von 200 kN/m² beim DN100 PE-ummantelten Stahlrohr



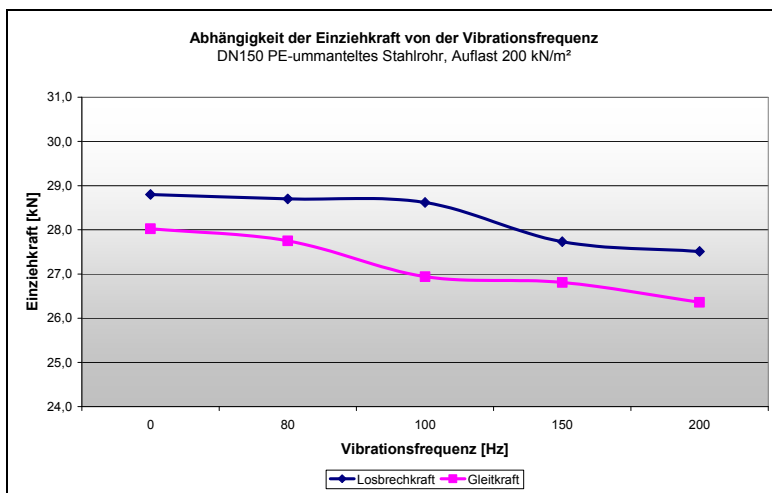
Abhängigkeit der Einziehkraft von der Vibrationsfrequenz bei statischer Auflast von 400 kN/m² beim DN100 PE-ummantelten Stahlrohr



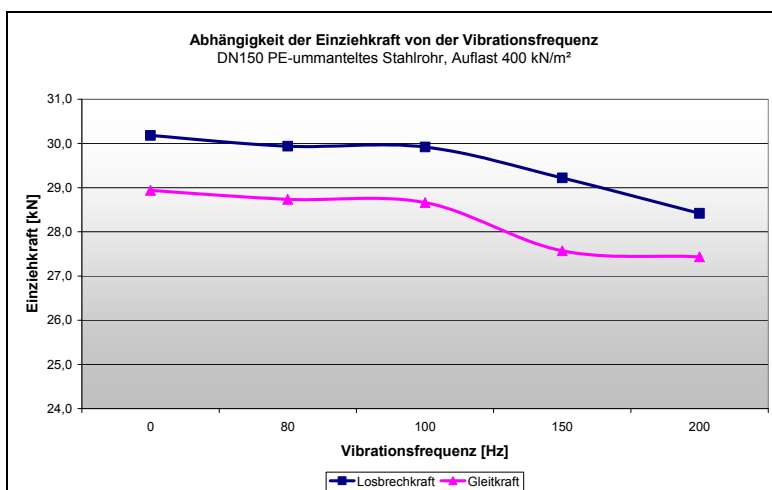
Abhängigkeit der  
Einziehkraft (Gleitkraft) von  
der Einziehgeschwindigkeit  
beim DN100 PE-  
ummantelten Stahlrohr



Abhängigkeit der Einziehkraft von der statischen Auflast ohne Vibration beim DN150 PE-ummantelten Stahlrohr

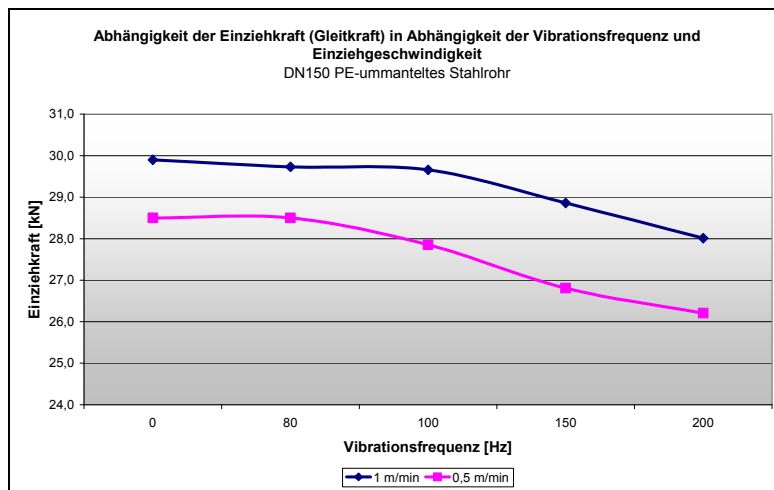


Abhängigkeit der Einziehkraft von der Vibrationsfrequenz bei statischer Auflast von 200 kN/m² beim DN150 PE-ummantelten Stahlrohr

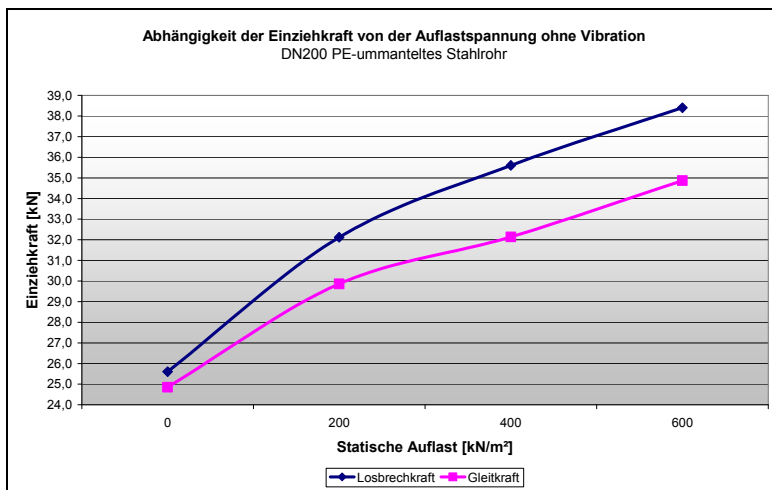


Abhängigkeit der Einziehkraft von der Vibrationsfrequenz bei statischer Auflast von 400 kN/m² beim DN150 PE-ummantelten Stahlrohr

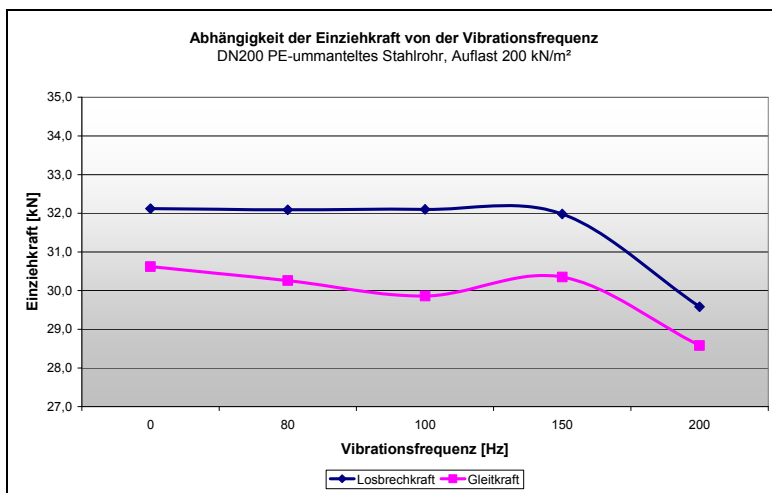




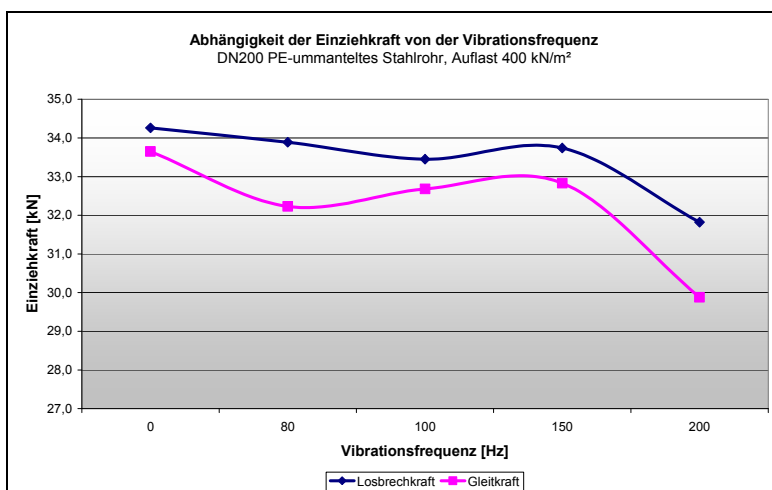
Abhängigkeit der  
Einziehkraft (Gleitkraft) von  
der Einziehgeschwindigkeit  
beim DN150 PE-  
ummantelten Stahlrohr



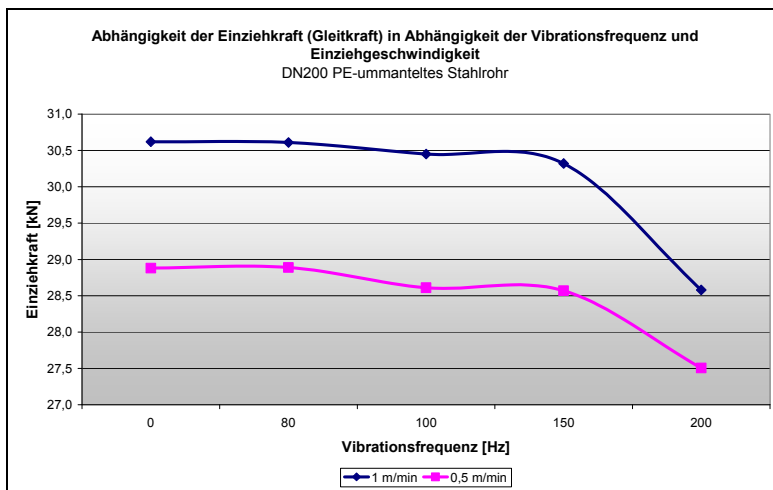
Abhängigkeit der Einziehkraft von der statischen Auflast ohne Vibration beim DN200 PE-ummantelten Stahlrohr



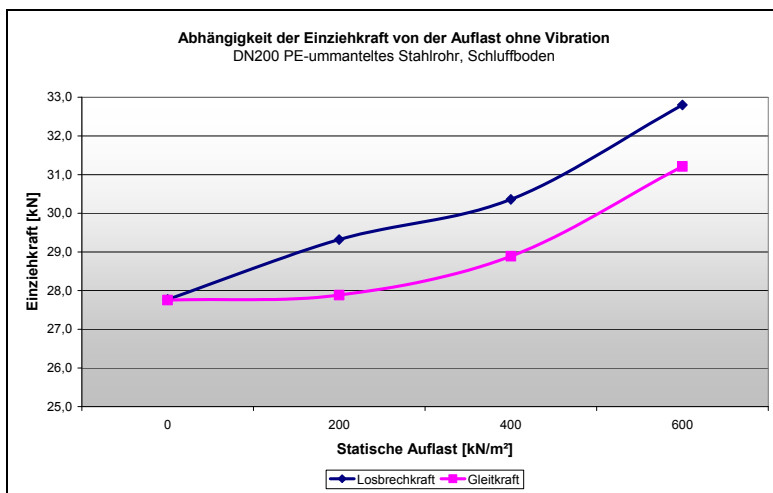
Abhängigkeit der Einziehkraft von der Vibrationsfrequenz bei statischer Auflast von 200 kN/m² beim DN200 PE-ummantelten Stahlrohr



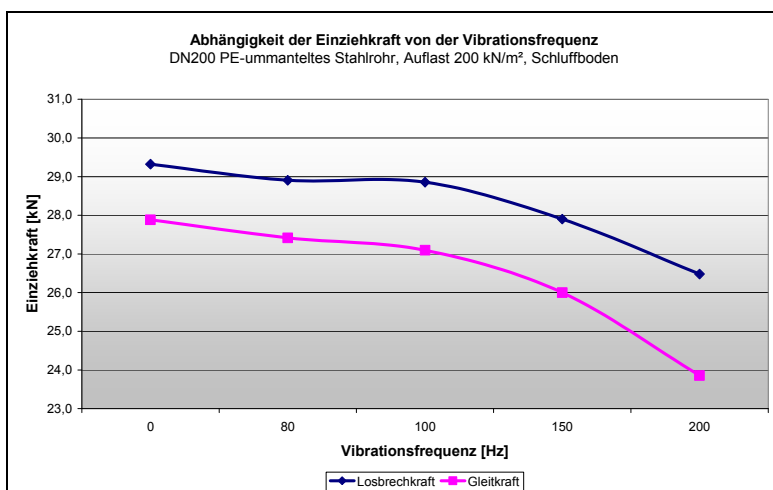
Abhängigkeit der Einziehkraft von der Vibrationsfrequenz bei statischer Auflast von 400 kN/m² beim DN200 PE-ummantelten Stahlrohr



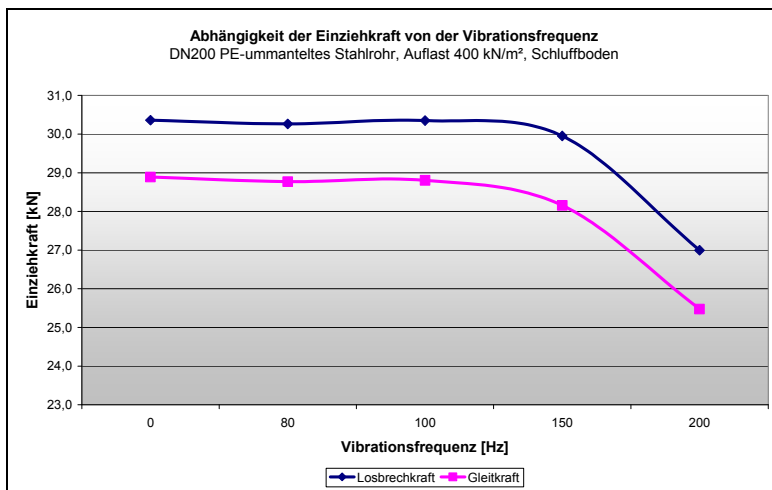
Abhängigkeit der Einziehkraft (Gleitkraft) von der Einziehgeschwindigkeit beim DN200 PE-ummantelten Stahlrohr



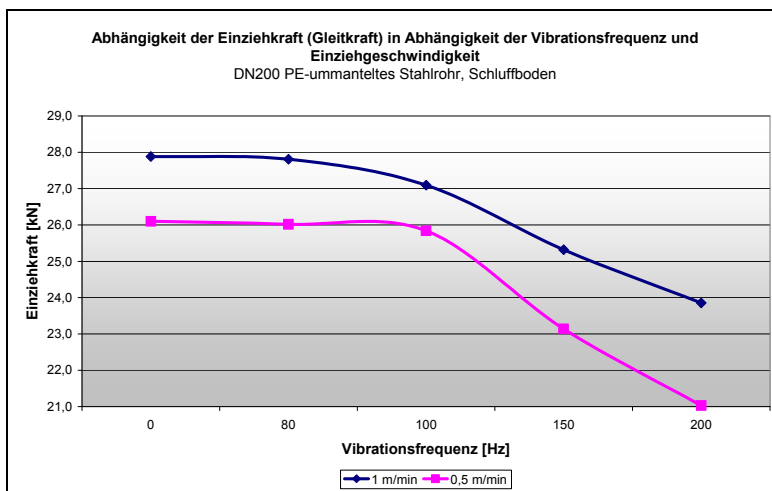
Abhängigkeit der Einziehkraft von der statischen Auflast ohne Vibration beim DN200 PE-ummantelten Stahlrohr im Schluffboden



Abhängigkeit der Einziehkraft von der Vibrationsfrequenz bei statischer Auflast von 200 kN/m² beim DN200 PE-ummantelten Stahlrohr im Schluffboden



Abhängigkeit der Einziehungskraft von der Vibrationsfrequenz bei statischer Auflast von 400 kN/m<sup>2</sup> beim DN200 PE-ummantelten Stahlrohr im Schluffboden



Abhängigkeit der Einziehungskraft (Gleitkraft) von der Einziehungsgeschwindigkeit beim DN200 PE-ummantelten Stahlrohr im Schluffboden

# Lebenslauf

## Persönliche Angaben

- Vorname, Name
- Geburtsdatum und -ort
- Familienstand

Stefan Roßbach

21. Februar 1976, Kirchen/Sieg

verheiratet, 1 Kind

## Berufstätigkeit

- seit 05/2004

**Wissenschaftlicher Mitarbeiter** am Institut für Bergbau der TU Clausthal, Lehrstuhl für Tagebau und Internationaler Bergbau

## Ausbildung

- 10/1996 - 05/2004
- 02/1997 - 04/2003
- 07/1995 - 07/1996
- 1986 - 05/1995

**Studium** an der TU Clausthal, Abschluss **Dipl.-Ing.**

**Studienfach** Geotechnik, Bergbau, Erdöl-/Erdgastechnik

**Studienschwerpunkt** Gewinnungsbergbau

Industriepraktika und Ausbildung zum **Bergbaubeflissenen**, Landesbergamt Clausthal

**Zivildienst:** Ausbildung zum Rettungssanitäter beim Deutschen Roten Kreuz

**Schullaufbahn:** Staatliches Kopernikus Gymnasium Wissen/Sieg, Abschluss: **Abitur** im Mai 1995